

# ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического  
университета им. Г.И. Носова

2021. Т.19, №3

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК). Сведения о журнале содержатся в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI на платформе Web of Science, ВИНТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии  
В.М. Колокольников (Россия)

Ж.-Б. Вогт (Франция), В.Е. Громов (Россия),  
Я. Грум (Словения), М. Дабала (Италия),  
Х. Дыя (Польша), Р.О. Дюссан (Индия),  
Р. Кавалла (Германия), В.Н. Калмыков (Россия),  
Д.Р. Каплунов (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),  
О.С. Логунова (Россия), Д. Милованович (Сербия),  
К. Мори (Япония), И. Мусирин (Малайзия),  
А.Б. Найзабеков (Казахстан), М. Пьетшик (Польша),  
В.Ф. Рашников (Россия), Г.А. Роджерсон (Великобритания),  
В.М. Счастливцев (Россия), О.Н. Тулупов (Россия),  
Ю Фенг (Китай), В.Р. Храмшин (Россия),  
Р. Цин (Великобритания)

## РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов

Первый заместитель главного редактора  
М.А. Полякова

Заместители главного редактора:

А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,

Н.Н. Орехова, В.Р. Храмшин

Ответственный секретарь М.В. Шубина

Редактор Н.П. Боярова

Технический редактор И.В. Ключникова

Перевод на английский О.Е. Сухих

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2021

Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и оплатить в удобной для Вас форме на подписной страничке сайта Агентства «Книга-Сервис» по ссылке:

код html: <http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-59632 от 10.10.2014 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.  
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.2010.

### Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402  
Тел.: (3519) 22-14-93.  
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>  
Email: [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto:rio_mgtu@mail.ru); [vestnik@mgtu.ru](mailto:vestnik@mgtu.ru)

### Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

### Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии  
Выход в свет 27.09.2021. Заказ 235. Тираж 500 экз. Цена свободная.

# VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

---

**2021. Vol.19, no.3**

---

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations (the list issued by the Higher Attestation Commission). Information about the journal can be found in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI on the Web of Science platform, VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. The digital version of the Journal is available at eLIBRARY.RU.

---

**PUBLISHED SINCE MARCH, 2003**

---

## **EDITORIAL BOARD MEMBERS**

Head of the Editorial Board V.M. Kolokoltsev (Russia)

M. Dabala' (Italy), R.O. Dusane (India),  
H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),  
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia),  
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),  
R. Kawalla (Germany), V.R. Khramshin (Russia),  
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),  
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),  
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),  
M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK), V.F. Rashnikov (Russia),  
G.A. Rogerson (UK), V.M. Schastlivtsev (Russia),  
O.N. Tulupov (Russia), J.-B. Vogt (France)

## **EDITORIAL STAFF**

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:  
A.G. Korchunov, O.S. Logunova,  
V.R. Khramshin, N.N. Orekhova

Executive Secretary M.V. Shubina

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor I.V. Klyunnikova

Translated into English O.E. Sukhikh

---

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021

---

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University  
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000)

16+ in accordance with Federal Law №436-FZ dated 29.12.2010

## **Editorial office:**

402, 45/2 Karl Marks prospekt,  
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Phone: +7 (3519) 221 493.  
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>  
Email: [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto:rio_mgtu@mail.ru); [vestnik@mgtu.ru](mailto:vestnik@mgtu.ru)

## **Publisher office:**

45/2 Karl Marks prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

## **Printing office:**

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date: 27.09.2021. Order 235. Circulation: 500. Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Разработка полезных ископаемых.....5</b>	
<i>Хоменко О.Е., Кононенко М.Н., Ляшенко В.И.</i> Обоснование технологий и средств для проведения горизонтальных горных выработок с использованием эмульсионных взрывчатых веществ.....5	
<i>Голик В.И., Разоренов Ю.И., Мицик М.Ф., Якишина В.В.</i> Опыт шахтного выщелачивания металлов из руд.....16	
<i>Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е.</i> Схема и режим флотации для извлечения золота из упорных руд.....24	
<i>Чебан А.Ю.</i> Уменьшение пыления при добыче и перевалке угля путем совершенствования выемочного оборудования.....37	
<b>Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов.....44</b>	
<i>Королев А.А., Шунин В.А., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Воинов Р.С.</i> Кинетика цементации ртути и селена на алюминии.....44	
<b>Литейное производство.....54</b>	
<i>Гутько Ю.И., Войтенко В.В.</i> Перспективные материалы для изготовления одноразовых и многоразовых стержневых ящиков ....54	
<b>Технологии обработки материалов.....61</b>	
<i>Слабкий Д.В., Сергеенко С.Н., Попов Ю.В., Салиев А.Н.</i> Рентгеноструктурный анализ порошковых материалов на основе механохимически активированной стружки Д-16 с добавлением порошка никеля.....61	
<b>Материаловедение и термическая обработка металлов .....68</b>	
<i>Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Чегуров М.К.</i> Электронно-микроскопические исследования механизмов разрушения конструкционных сталей, полученных на основе 3D-печати.....68	
<i>Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М., Рябов Д.А.</i> Влияние технологии гип на структуру и свойства никелевого сплава ВЖ 159.....75	
<b>Стандартизация, сертификация и управление качеством .....84</b>	
<i>Пивоварова К.Г.</i> Управление качеством метизной продукции на основе робастного параметрического проектирования.....84	
<i>Наркевич М.Ю., Логанова О.С., Корниенко В.Д., Николаев А.А., Тюлюмов А.Н., Злыдарев Н.В., Дерябин Д.И.</i> Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности: эмпирическая основа.....90	

## CONTENTS

<b>Mining.....5</b>	
<i>Khomenko O.E., Kononenko M.N., Lyashenko V.I.</i> Rationale for Technologies and Facilities for Carrying out Horizontal Mine Workings Using Emulsion Explosives .....5	
<i>Golik V.I., Razorenov Yu., Mitsik M.F., Yakshina V.V.</i> Experience in Mine Leaching of Metals From Ores ..... 16	
<i>Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E.</i> Flotation Flowsheet and Mode for Recovery of Gold from Refractory Ores ..... 24	
<i>Cheban A.Yu.</i> Reducing Dust in Mining and Transferring Coal by Improving Mining Equipment..... 37	
<b>Recycling of Man-Made Mineral Formations and Waste.....44</b>	
<i>Korolev A.A., Shunin V.A., Timofeev K.L., Maltsev G.I., Voinkov R.S.</i> Kinetics of Mercury and Selenium Precipitation on Aluminum..... 44	
<b>Foundry .....54</b>	
<i>Gutko Yu.I., Voytenko V.V.</i> Advanced Materials for Manufacturing Disposable and Reusable Core Boxes ..... 54	
<b>Material Process Engineering.....61</b>	
<i>Slabkiy D.V., Sergeenko S.N., Popov Yu.V., Saliev A.N.</i> X-Ray Diffraction Analysis of Powder Materials Based on Mechanochemically Activated Chips D-16 and Added Nickel Powder ..... 61	
<b>Materials Science and Heat Treatment of Metals .....68</b>	
<i>Anosov M.S., Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Chegurov M.K.</i> Electron Microscopy Studies on the Fracture Mechanisms of Structural Steels Fabricated by 3D Printing ..... 68	
<i>Khlybov A.A., Belyaev E.S., Ryabtsev A.D., Belyaeva S.S., Getmanovsky Yu.A., Yavtushenko P.M., Ryabov D.A.</i> Influence of the HIP Technology on the Structure and Properties of Nickel Alloy VZH159 ..... 75	
<b>Standardization, Certification and Quality Management.....84</b>	
<i>Pivovarova K.G.</i> Metalware Quality Management Based on a Robust Parameter Design..... 84	
<i>Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Nikolaev A.A., Tyulyumov A.N., Zlydarev N.V., Deryabin D.I.</i> Quality of Materials, Products and Structures in Industrial Safety: an Empirical Basis ..... 90	

**Моделирование металлургических процессов .....102**

*Левыкина А.Г., Горбунов К.С., Позднякова А.И.,  
Соловьев В.Н.*

Исследование теплового состояния металла с  
использованием методов физического и  
математического моделирования.....102

**Новые технологические процессы  
и оборудование.....109**

*Полецков П.П., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г.,  
Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Кухта Ю.Б.*

Анализ актуальных направлений исследований  
в области производства multifunctional  
материалов для экстремальных условий  
эксплуатации .....109

**Modelling of Metallurgical Processes..... 102**

*Levykina A.G., Gorbunov K.S., Pozdnyakova A.I.,  
Solovyov V.N.*

Study on a Thermal State  
of Steel Using Methods of Physical  
and Mathematical Modeling ..... 102

**New Technological Processes  
and Equipment..... 109**

*Poletskov P.P., Gulin A.E., Emaleeva D.G.,  
Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Kukhta Yu.B.*

Analysis of Current Areas  
of Research in Production  
of Multifunctional Materials for Extreme  
Operating Conditions..... 109

# РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.235

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-5-15



## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Хоменко О.Е.<sup>1</sup>, Кононенко М.Н.<sup>1</sup>, Ляшенко В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина

<sup>2</sup>Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии», Желтые Воды, Украина

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы). В последнее время стали широко внедряться эмульсионные взрывчатые вещества (ВВ) отечественного производства. Они являются более безопасными в эксплуатации и превосходят по своим энергетическим характеристикам тротилосодержащие ВВ. Это является актуальной задачей на современном этапе развития горнодобывающих предприятий мира. **Используемые методы.** Описана технология нового технологического решения по обоснованию и выбору рациональных параметров буровзрывных работ с использованием эмульсионных ВВ при проведении подготовительных выработок. Они включали анализ горно-геологических условий залегания залежи и отработки очистных камер с помощью камерных систем разработки и закладкой выработанного пространства, применяемой технологии буровзрывных работ (БВР) при проведении горизонтальных и наклонных (до 12°) горных выработок и теоретические исследования, которые выполнялись с помощью математического метода моделирования. **Новизна.** Разработана концепция обоснования и выбора рациональных параметров БВР для проведения горизонтальных горных выработок с помощью высокопроизводительного самоходного оборудования и применения эмульсионных ВВ, а также учета их энергетических характеристик и физико-механических свойств пород. **Результат.** Применение эмульсионного ВВ типа «Украинит-П-СА» позволит уменьшить количество шпуров в забое выработки до 12% по сравнению с использованием ВВ типа «Аммонит № 6 ЖВ». Расходы взрывчатых материалов при использовании паспорта БВР при применении ВВ «Украинит-П-СА» уменьшится до 6%. Эти показатели свидетельствуют о необходимости применения эмульсионного ВВ типа «Украинит-П-СА» при проведении подготовительных и нарезных выработок буровзрывным способом, а также применение на проходческих работах высокопроизводительного проходческого оборудования. Ожидаемый экономический эффект, полученный в результате технико-экономического сравнения по основным статьям калькуляции расходов, свидетельствует о целесообразности внедрения разработанного технологического решения. **Практическая значимость.** Результаты проведенных исследований позволяют снизить себестоимость проведения 1 м выработки до 11%, а также осуществить ресурсосбережение при производстве горнопроходческих работ и увеличить скорость проведения выработок в условиях Частного акционерного общества «Запорожский железорудный комбинат» (ЧАО «ЗЖРК») до 200 м в месяц. Повышается также эффективность добычи рудного сырья для черной и цветной металлургии.

**Ключевые слова:** эмульсионные взрывчатые вещества, паспорт буровзрывных работ, горнопроходческое оборудование, самоходная буровая установка, погрузочно-доставочная машина, зарядная установка.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность В.Ю. Усатому (ЧАО «Запорожский ЖРК»), В.С. Ричко (ПАО «Криворожский ЖРК»), В.Н. Пухальскому (ГП «Восточный ГОК»), А.Х. Дудченку (ГП «УкрНИПИИпромтехнологии») и другим специалистам этих предприятий за содействие во внедрении полученных научных и практических результатов исследований.

© Хоменко О.Е., Кононенко М.Н., Ляшенко В.И., 2021

### Для цитирования

Хоменко О.Е., Кононенко М.Н., Ляшенко В.И. Обоснование технологий и средств для проведения горизонтальных горных выработок с использованием эмульсионных взрывчатых веществ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 5–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-5-15>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# RATIONALE FOR TECHNOLOGIES AND FACILITIES FOR CARRYING OUT HORIZONTAL MINE WORKINGS USING EMULSION EXPLOSIVES

Khomenko O.E.<sup>1</sup>, Kononenko M.N.<sup>1</sup>, Lyashenko V.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>State Enterprise Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** In recent years, emulsion explosives of domestic production became widely introduced. They are safer in operation and surpass TNT-containing explosives in their energy characteristics. This is an urgent task at the present stage of development of the world's mining enterprises. **Methods Used.** The authors described the technology of a new technological solution for providing the rationale and selecting reasonable parameters for drilling and blasting operations using emulsion explosives during development workings. They included an analysis of the mining and geological conditions of the deposit and the development of stopes using pillar-and-breast systems and backfilling of the worked-out area, the technology of drilling and blasting used when conducting horizontal and inclined (up to 12°) mine workings and theoretical studies, which were carried out using a mathematical modeling method. **Novelty.** The authors developed a concept of providing the rationale and selecting reasonable parameters of drilling and blasting parameters for horizontal mine workings using high-performance self-propelled equipment and the use of emulsion explosives, as well as taking into account their energy characteristics and physical and mechanical properties of rocks. **Result.** The use of emulsion explosives of the Ukrainit-P-SA type will make it possible to reduce the number of holes in the working face down to 12% in comparison with the use of the Ammonit No. 6 ZhV explosives. The consumption of explosives, when using a blasting pattern and the Ukrainit-P-SA explosives, will decrease to 6%. These indicators indicate the need for using emulsion explosives of the Ukrainit-P-SA type, when carrying out preparatory and temporary workings by drilling and blasting, as well as the use of high-performance tunneling equipment in tunneling operations. The expected economic potential, obtained as a result of a technical and economic comparison for the main items of cost calculation, indicates the feasibility of introducing the developed technological solution. **Practical Relevance.** The conducted research contribute to reducing the cost of 1 m of mining to 11%, as well as to saving resources in the production of mining operations and increasing the speed of mining at the Zaporizhzhya Iron Ore Plant private joint stock company (PJSC ZZRK), Ukraine, to 200 m per month. This also contributes to increasing efficiency of extraction of ore raw materials for ferrous and non-ferrous metallurgy.

**Keywords:** emulsion explosives, blasting pattern, tunneling equipment, self-propelled drilling rig, load haul dumper, charging installation.

**Acknowledgement.** The authors express their gratitude to V.Yu. Usaty (Zaporizhzhya Iron Ore Plant PJSC), V.S. Richko (Kryvyi Rih Iron Ore Plant PJSC), V.N. Pukhalsky (State Enterprise Vostochny Ore Mining and Processing Plant), A.Kh. Dudchenko (State Enterprise Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology) and other specialists of the said enterprises for their support in introducing the scientific and practical results of the research.

## For citation

Khomenko O.E., Kononenko M.N., Lyashenko V.I. Rationale for Technologies and Facilities for Carrying out Horizontal Mine Workings Using Emulsion Explosives. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 5–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-5-15>

## Введение

Подземная разработка железных руд осуществляется в Украине с применением буровзрывного способа проведения горных выработок. При этом скорость проведения выработок зависит от правильного составления и расчета паспорта буровзрывных работ (БВР) [1]. Для повышения безопасности, а также снижения количества вредных газов, образующихся в результате, в последнее время стали широко внедряться эмульсионные взрывчатые вещества (ВВ) отечественного производства [2–4]. Они являются более безопасными в эксплуатации и превосходят

по своим энергетическим характеристикам тротилосодержащие ВВ [5, 6]. Высокопроизводительное горнопроходческое оборудование и различные методики расчета параметров БВР не принесут существенного эффекта без разработки паспортов БВР с рациональным расположением шпуров в забое, которые учитывают характеристики эмульсионного ВВ [7]. Это является актуальной задачей на современном этапе развития горнодобывающих предприятий [8, 9].

**Цель работы.** Обоснование технологий и средств для проведения горизонтальных горных выработок с помощью высокопроизводительно-

го самоходного оборудования и применения эмульсионных ВВ, а также учета энергетических характеристик взрывчатого вещества и физико-механических свойств пород.

Для реализации цели поставлены следующие задачи:

1. Установить изменения технологических параметров БВР при проведении горных выработок.
2. Обосновать рациональные параметры БВР при применении эмульсионных ВВ.
3. Определить экономическую эффективность разработанного технологического решения.

**Методология.** Поставленные задачи решались комплексным методом, включающим анализ горно-геологических условий залегания залежи и отработки очистных камер с помощью камерных систем разработки с закладкой выработанного пространства, применяемой технологии буровзрывных работ при проведении горных выработок и теоретические исследования, которые выполнялись с помощью математического метода моделирования.

**Теория вопроса.** Анализ технологии проведения выработок. Главным параметром для проектирования паспортов буровзрывных работ при проведении горных выработок является линия наименьшего сопротивления (ЛНС) отбойного шпура и расстояние между шпурами. Далее основным этапом составления паспорта БВР является определение количества шпуров на забой выработки, а также разработка рациональной схемы их расположения. Главным критерием, которым пользуются до сих пор, является количество шпуров на забой, который прямо пропорционален количеству ВВ, необходимого для разрушения определенного объема горной массы.

Теоретические основы разрушения горных пород взрывом широко освещены в исследованиях М.М. Протодяконова, Г.И. Покровского, Э.О. Миндели, Б.Н. Кутузова, М.А. Садовского, В.Н. Родионова и др. Однако до настоящего времени не разработано общепринятой методики расчета основных параметров БВР, которая позволяла бы получать пригодные для практики результаты. Поэтому на сегодняшний день широко используется упрощенная методика, которая сводится к определению рациональной вместимости ВВ в одном шпуре и установленного практикой ее удельного расхода. На основании этих показателей определяется количество шпуров для забоя выработки. Далее выбирают тип вруба, который размещается в основном в геометрическом центре выработки, а в остальной площади сечения распределяют другие

группы шпуров [10, 11].

В условиях ЧАО «ЗЖРК» (г. Днепрорудный, Украина), которое добывает богатую железную руду подэтажно-камерной системой разработки с закладкой, ежегодно с помощью БВР проводится до 23 тыс. м подготовительных и нарезных выработок. Применение на проходческих работах высокопроизводительного самоходного оборудования производства Швеции, Финляндии и Словакии способствует увеличению объемов подготовительных работ до 30 тыс. м в год. Это позволяет ускорить темпы подготовки и нарезки новых блоков. Однако основным сдерживающим фактором, который снижает фактический потенциал горнопроходческого оборудования при проведении горных выработок, является применение нерациональных параметров БВР, а именно применения ВВ, которые имеют меньшую степень завершенности реакции взрывчатого превращения по сравнению с эмульсионными ВВ, что влечет за собой перерасход взрывчатых материалов, увеличение трудоемкости заряжения и, как следствие, снижение темпов проведения горных выработок.

Выполнив анализ применяемых паспортов БВР для проведения откаточных штреков лежачего и висячего боков, можно сделать вывод, что шпуры в забое выработки имеют разные диаметры – 43 или 51 мм, а в качестве ВВ применяется «Аммонит №6 ЖВ», который по сравнению с эмульсионной ВВ типа «Украинит-П-СА» имеет до 30% меньшую степень завершенности реакции взрывчатого превращения. Количество шпуров в забое выработки не изменяется при изменении прочности пород, это говорит о том, что оно выбрано нерационально и параметры БВР обоснованы недостаточно. А применение в качестве горнопроходческого оборудования горных машин от различных производителей может привести к увеличению времени простоев из-за разной их производительности.

**Расчет параметров БВР.** Главным параметром для проектирования паспортов буровзрывных работ при проведении горных выработок является ЛНС отбойного шпура и расстояние между шпурами, которые определяются по следующим выражениям [12]:

$$W = 47 \cdot K_m \cdot K_3 \cdot d_3 \cdot \sqrt{\frac{\Delta}{\gamma \cdot e}}, \quad (1)$$

где  $W$  – линия наименьшего сопротивления отбойного шпура, м;  $K_m$  – коэффициент местных геологических условий;  $K_3$  – коэффициент зажима, равный 0,6 при  $S_{np} < 4 \text{ м}^2$ , 0,7–0,8 – при

$S_{пр} = 4-60 \text{ м}^2$  и  $0,9$  при  $S_{пр} > 60 \text{ м}^2$ ;  $d_3$  – диаметр заряда, м;  $\Delta$  – плотность заряжания, т/м<sup>3</sup>;  $e$  – коэффициент работоспособности ВВ, равный  $\frac{380}{P_{ВР}}$

или  $\frac{4316}{Q_{ВР}}$  ( $P_{ВВ}$  – работоспособность ВВ, см<sup>3</sup>;

$Q_{ВВ}$  – теплота взрыва, кДж/кг);  $\gamma$  – плотность горных пород, т/м<sup>3</sup>.

$$a = KW, \quad (2)$$

где  $a$  – расстояние между шпурами, м;  $K$  – коэффициент, учитывающий назначение шпура,  $K = 1,0-1,3$  – для отбойных шпуров,  $K = 0,75$  – для контурных шпуров почвы,  $K = 0,85$  – для контурных шпуров кровли,  $K = 0,95$  – для контурных шпуров по бокам выработки.

Шпуровой заряд, особенно если ЛНС совпадает с осью шпура, разрушает породу только в ближайшей к забою части. Донная часть остается в неразрушенной породе в виде так называемого «стакана». Это приводит к тому, что за один взрыв забой выработки продвигается не на полную глубину шпуров. Один из важнейших параметров взрывных работ является длина заходки – подвижки забоя за одно взрывание (за один цикл), при этом  $l_{зах} < l_{ш}$ .

Коэффициентом использования шпуров (КИШ) – это отношение подвигания забоя за одно взрывание до глубины шпура:

$$\eta = \frac{l_{зах}}{l_{ш}}. \quad (3)$$

КИШ – это безразмерная величина, характеризующая эффективность действия взрыва зарядов ВВ, один из основных критериев качества взрыва, правильности выбранной схемы расположения шпуров и удельных расходов ВВ. Нормативное значение КИШ равно 0,8. По данным практики ведения БВР в монолитных породах, с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова  $f = 15-20$  удовлетворительным может считаться КИШ в пределах 0,75–0,8; в породах средней прочности – до 0,9; в слабых породах эта величина должна приближаться к единице. В некоторых «стаканах» может оставаться ВВ. Поэтому нельзя бурить шпуры следующего цикла в «стаканы», то есть запрещается их разбуривать, это может вызвать несанкционированный взрыв ВВ с трагическими последствиями. При проектировании БВР рекомендуют следующие значения КИШ: на одну открытую поверхность – 0,8–0,85; на две – 0,90–0,95. При проведении промышленных испытаний новых

типов ВВ и новых технологий ведения взрывных работ КИШ устанавливают по подвиганию забоя в определенный период времени:

$$\eta = \frac{l_y}{n_{ц} \cdot l_{ш.ср}}, \quad (4)$$

где  $l_y$  – уход забоя выработки в заданный период времени (устанавливается маркшейдерскими измерениями), м;  $n_{ц}$  – количество взрываний за контрольный период;  $l_{ш.ср}$  – средняя глубина шпуров, м.

Глубина шпуров в неустойчивых породах определяется требованиями безопасного проведения работ, на криволинейных участках – требованиями механического порядка, состоящими в обеспечении снижения влияния взрыва на крепление выработок и недопущения увеличения площади сечения более регламентированных норм. В случае, если выработка проводится с заданными темпами проходки, то глубина шпуров

$$l_{ш} = \frac{L}{k \cdot m \cdot n \cdot \eta}, \quad (5)$$

где  $L$  – среднемесячные темпы проведения выработки, м/мес.;  $k$  – количество рабочих дней в месяц, сут;  $m$  – количество рабочих смен по проходке выработки в сутки;  $n$  – количество циклов в смену;  $\eta$  – коэффициент использования шпуров.

Важным условием высокой эффективности проведения выработок является правильный выбор комплекта шпуров, что обеспечивает максимальный коэффициент их использования, который определяет скорость проведения выработок. Рациональные параметры БВР, такие как тип вруба, схема расположения и число отбойных шпуров, тип ВВ и величина заряда, зависят от конкретных горно-геологических условий. В современной практике широко используются типы врубов, которые классифицируются по расположению врубовых шпуров по площади забоя выработки: наклонные врубы (отрывного действия) и прямые врубы (дробящего действия). Последние типы врубов используются при любой прочности пород, но хорошие результаты были достигнуты в крепких монолитных породах. Место расположения вруба оказывает существенное влияние на показатели БВР. Согласно официально действующим на горных предприятиях инструкциям вруб располагают сбоку, сверху, внизу или в центре забоя выработки. После выбуривания врубовых шпуров приступают к бурению отбойных шпуров, основным параметром которых является величина отбиваемого слоя  $W$ , так называемая ЛНС на вновь об-



разованную поверхность. Параметр ЛНС, как правило, уточняется после анализа результатов трех пробных взрывов.

Для обеспечения ухода проходческого забоя горизонтальных и наклонных горных выработок до 3,5 м (и более) разработаны варианты прямых призматических врубов, которые приведены на рис. 1–3.

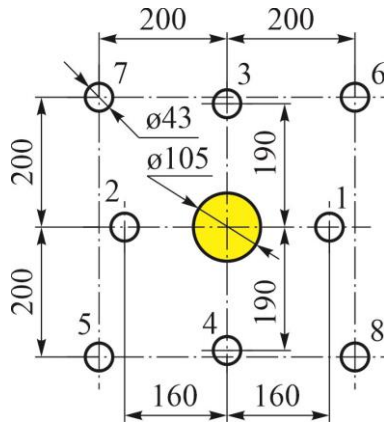


Рис. 1. Вариант призматического вруба с незаряженной скважиной диаметром  $d=105$  мм  
Fig. 1. An option of a box-type cut with an uncharged borehole,  $d = 105$  mm in diameter

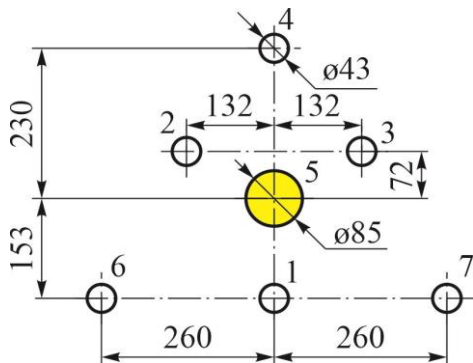


Рис. 2. Вариант призматического вруба со скважиной диаметром  $d=85$  мм  
Fig. 2. An option of a box-type cut with a borehole,  $d = 85$  mm in diameter

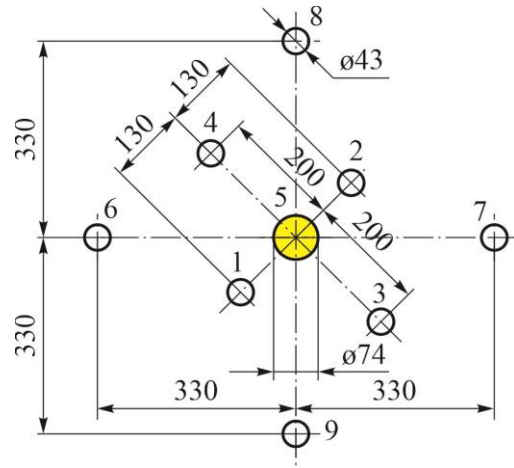


Рис. 3. Вариант призматического вруба со скважиной диаметром  $d=74$  мм  
Fig. 3. An option of a box-type cut with a borehole,  $d = 74$  mm in diameter

Все варианты конструкций призматических врубов построены по расчетным данным согласно **табл. 1 и 2**. Врубы обеспечены достаточным расчетным компенсационным объемом (скважинами различных диаметров) для работы шпуровых зарядов на разрушение трапецевидных перегородок, который характеризуется коэффициентом компенсационного объема.

Понятие коэффициента компенсационного объема вводится исходя из следующих предположений:

- в естественном ненарушенном состоянии горный массив занимает единицу объема (например,  $1 \text{ м}^3$ );
- в разрушенном состоянии в зависимости от кусковатости единица объема горного массива характеризуется коэффициентом разрыхления, который может изменяться от 1,55 до 3;
- в горном производстве коэффициент разрыхления единицы объема горного массива в зависимости от кусковатости изменяется от 1,5 до 1,8;

Таблица 1. Предельные расстояния между осями заряженного шпура и компенсационной скважины (шпура) в прямом врубе

Table 1. Limit distances between the axes of a charged borehole and a perimeter hole (borehole) in a box-type cut

Диаметр компенсационной скважины (шпура), мм	Диаметр заряженного шпура, мм	Диаметр патрона, мм	Предельные расстояния между осями шпура и компенсационной скважиной (шпуром), мм
105	40	32	189
85	40	32	153
74	40	32	133
65	40	32	117
57	40	32	103

Таблица 2. Технологические параметры и конструктивные элементы вариантов прямых врубов  
Table 2. Process parameters and structural elements of box-type cut options

Элементы конструкции врубов	Варианты конструкций прямых врубов						
	1	2	3	4	5	6	7
Количество компенсационных скважин $N_{к.с.}$ , ед.	1	1	1	2	2	2	2
Диаметр скважины $d_{к.с.}$ , мм	105	85	74	74	65	65	65
Длина компенсационной скважины $l_{к.с.}$ , м	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Количество врубовых шпуров $N_{в.ш.}$ , ед.	4	4	4	4	5	4	3
Диаметр врубовых шпуров $d_{в.ш.}$ , мм	40(36)	40(36)	40(36)	40(36)	40(36)	40(36)	40(36)
Длина врубовых шпуров $l_{в.ш.}$ , м	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Масса подчищающего заряда $Q_3$ , кг	-	0,3	0,3	-	0,2	0,2	0,2
Количество подчищающих зарядов, ед.	-	1	1	-	2	2	2
Диаметр патронов аммонита №6 ЖВ, мм	32	32	32	32	32	32	32

– при коэффициенте разрыхления менее 1,25 идет процесс глубокого зажима, когда горная масса спрессовывается и теряет подвижность, что характеризуется термином «коэффициент зажима». Понятие «большой (глубокий) зажим горной массы» характеризует состояние разрушенного горного массива: уже раскрыты трещины и микротрещины, а горный массив сохраняет форму ограниченного (компенсационного) объема;

– при коэффициенте зажима менее 1,15 колонковые заряды простреливают в случае отсутствия пористости горного массива.

В общем виде единица горного массива при разрушении занимает компенсационный объем, который зависит от степени его дробления и имеющегося свободного объема по исходным условиям.

Для оценки состояния разрушенной горной массы в ограниченном объеме выполнены расчеты коэффициентов компенсационных объемов трех вариантов врубов от изменения компенсационного объема в донной части вруба от количества поочередно взорванных зарядов шпуров при  $l_{ш} > 3$  м для вариантов 1, 2, 3 (рис. 4).

Коэффициенты компенсационных объемов для различных вариантов врубов при взрывах первого заряда врубовых шпуров на компенсационную скважину:  $d = 105$  мм – 2,5;  $d = 85$  мм – 2,14;  $d = 74$  мм – 2,0. При взрыве четвертого врубового заряда коэффициент компенсационного объема составил для компенсационных скважин  $d = 105$  мм – 1,44;  $d = 85$  мм – 1,36;  $d = 74$  мм – 1,34 (см. рис. 4). Из графиков также видно, что работа первых зарядов в донной части вруба на скважины происходит в условиях с избыточным компенсационным объемом, а работа последних врубовых зарядов (четвертых по

замедлению) происходит в условиях со слабым зажимом. При правильно выполненных в процессе бурения предложенных конструкций врубов будут соблюдены вышеописанные условия работы врубовых зарядов и ожидается качественная проработка ими горного массива, что позволит достичь высокого эффекта использования шпуров всего забоя. Выбор наиболее эффективных врубов из предлагаемых вариантов необходимо производить в процессе опытных работ при внедрении паспортов буровзрывных работ в забоях горизонтальных и наклонных горных выработок.

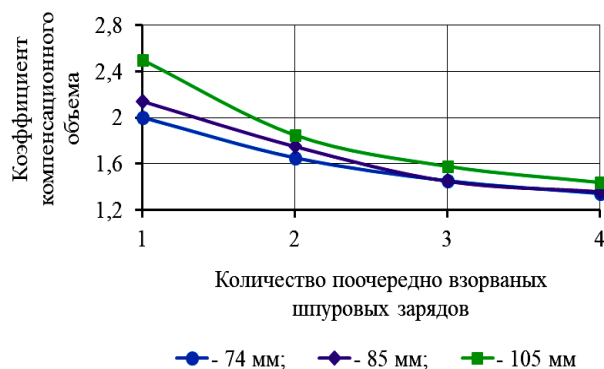


Рис. 4. Графики изменения коэффициента компенсационного объема в донной части вруба от количества поочередно взорванных зарядов шпуров при  $l_{ш} > 3$  м

Fig. 4. Graphs of the change in the coefficient of the compensation volume in the bottom part of the cut versus the number of charges of a blast hole, exploded by turn, at  $l_{ш} > 3$  m

Авторами в работах [13, 14] предлагается следующая последовательность решения основных задач проектирования паспортов БВР с учетом параметра оптимизации размещения шпуров:

1. Определение площадей для размещения различных групп шпуров (врубных, отбойных и контурных шпуров).

2. Определение координат контурных шпуров.

3. Определение координат отбойных шпуров.

4. Проектирование паспорта БВР на основе рассчитанных координат шпуров.

Дальнейшее развитие методики расчета и составления паспортов БВР раскрыты в работах [15, 16] и представлены на доступном инженерном языке. Расчет паспорта БВР для проведения выработок включает в себя следующие основные этапы:

- расчет общего количества ВВ на забой;
- расчет количества шпуров на забой с учетом занятых ими площадей (зон);
- расположение шпуров в забое;
- расчет заряда ВВ на шпур;
- расчет общего фактического расхода ВВ на забой выработки.

Представленная выше методика расчета параметров БВР при проведении горных выработок предназначена для использования тротило-содержащих взрывных материалов (ВМ). Авторами в работах [17, 18] разработана новая методика расчета параметров БВР при проведении подземных горных выработок с использованием эмульсионных ВВ типа «Украинит» (табл. 3). Сущность методики заключается в определении коэффициента относительной работоспособности эмульсионного ВВ типа «Украинит» с уче-

том степени завершенности реакции взрывчатого превращения и реализации скорости детонации, что позволяет определить необходимое количество ВВ на забой. Установленные закономерности позволяют определить скорость детонации в зависимости от плотности и диаметра заряда, которые изменяется по степенному закону. Это позволило авторам усовершенствовать закономерности определения размеров зон смятия и трещинообразования, которые образуются вокруг шпуров с учетом энергетических характеристик эмульсионного ВВ «Украинит» и физико-механических свойств пород.

Расчет и составление паспортов БВР при использовании патронированного ВВ типа «Аммонит №6» ЖВ и «Украинит-П-СА», выполнены для следующих горно-геологических условий: выработка – откатный штрек лежащего бока горизонта 940 м, ширина выработки – 3,75 м, высота выработки – 3,35 м, длина выработки – 500 м, коэффициент крепости пород  $f = 10$ , диаметр шпура – 43 мм, глубина комплекта шпуров – 2,8 м, шахтная бурильная установка – DD311-40, погрузочно-доставочная машина – ЛН409Е.

Выполнив анализ технических показателей паспортов БВР при использовании различных типов ВВ можно сделать вывод, что при использовании ВВ типа «Украинит-П-СА» уменьшается количество шпуров в забое выработки и, соответственно, уменьшается суммарная их длина (табл. 4).

Таблица 3. Физико-химические и взрывчатые свойства патронированных ЭВВ «Украинит-П»

Table 3. Physicochemical and explosive properties of the Ukrainit-P packaged emulsion explosives

Наименование показателя	Норма		
Контролируемые показатели			
Внешний вид при температуре от 20 до 70°С	Пластичная однородная масса серого или желтого цвета с включениями микросфер		
Плотность при температуре (30 ± 10)°С, г/см <sup>3</sup>	П-С	П-СА	П-П
	1,00–1,30		
Полнота детонации открытого заряда патронированного ВВ диаметром 32 мм от ЕД-8Ж и от 100 г аммонита № 6ЖВ	Полная		
Неконтролируемые показатели			
Кислородный баланс, %	минус 0,3–минус 0,5	минус 0,5–минус 1,5	минус 0,3–минус 1,5
Удельный объем газовых продуктов взрыва, дм <sup>3</sup> /кг	820–840	800–820	840–860
Критический диаметр открытого заряда, мм	20	20	30
Скорость детонации заряда , м/с, не меньше	4900	4800	4400
Чувствительность к удару по ГОСТ 4545: нижняя граница на приборе № 3, мм, больше	500		
Токсичные газы взрыва в пересчете на СО, л/кг	до 15,0	до 25,0	до 20,0

Таблица 4. Технические показатели паспортов БВР при разных ВВ  
Table 4. Technical data of blasting patterns at different explosives

Показатели	Паспорт БВР	
	Аммонит №6 ЖВ	Украинит-П-СА
Площадь поперечного сечения, м <sup>2</sup>	11,5	11,5
Коэффициент крепости пород $f$	10	10
Бурильная установка DD311-40, шт.	1	1
Погрузочная машина ЛН409Е, шт.	1	1
Диаметр шпуров, мм	43	43
Число шпуров на цикл, шт.	<b>41</b>	<b>36</b>
Глубина шпуров, м	2,8	2,8
Число шпуро-метров на цикл, м	<b>117,05</b>	<b>103,5</b>
КИШ шпуров $\eta$	0,9	0,9
Расход ВВ, кг	<b>14520</b>	<b>13720</b>
Расход ЭД, шт.	<b>8000</b>	<b>7000</b>
Уход забоя за цикл, м	2,5	2,5
Выход породы за цикл, м <sup>3</sup>	28,75	28,75
Расход электроэнергии, кВт·ч	<b>45800</b>	<b>40050</b>
Расход коронок, шт.	36	36
Расход буровой стали, шт.	10	10
Расход анкеров, шт.	2500	2500
Количество смен, смен	200	200

Примечание. Жирным шрифтом выделены отличительные показатели.

Это приводит к уменьшению времени на бурение и зарядание. Расход ВВ, средств инициирования зарядов, а также материалов не превышает 10%. Дальнейшие экономические расчеты, которые выполнялись по основным статьям калькуляции затрат позволили установить, что при проведении полевого откаточного штрека лежащего бока горизонта 940 м с использованием эмульсионного ВВ типа «Украинит-П-СА» позволяет снизить себестоимость проведения 1 м выработки до 11%. Этим решена распространенная проблема современного горного производства при буровзрывной проходке горизонтальных и наклонных (до 12°) горных выработок с помощью высокопроизводительного самоходного оборудования и применения экологически чистых эмульсионных взрывчатых веществ.

При взрывных работах наиболее трудоемким процессом являются доставка ВВ и зарядание шпуров [19, 20]. Зарядание шпуров может быть ручным (патронированным ВВ) и механизированным россыпными или наливными эмульсионными ВВ. При механизированном зарядании применяют зарядчики, допущенные к применению Госнадзорхрантруда Украины, при ручном – в шпур патроны ВВ досылают забойником [21, 22]. В насто-

ящее время при проведении горных выработок широкое применение получили транспортно-доставочные машины, которые заменяют комплексы из погрузочного и транспортного оборудования. Транспортно-доставочные машины по сравнению с другими средствами погрузки и транспортировки имеют ряд существенных преимуществ.

На сегодня объемы и масштабы внедрения экологически чистого эмульсионного ВВ «Украинит» значительно увеличились – расширилась география и сфера применения на шахтах Украины: ПАО «КЖРК», ЧАО «Сухая Балка» (г. Кривой Рог) и ООО «Восток-Руда» (г. Желтые Воды), на ЧАО «ЗЖРК», опробованы также первые опытно-экспериментальные зарядания кругового веера скважин (диаметром 89–105 мм и длиной до 30 м), ведутся работы по совершенствованию технологии приготовления компонентов эмульсионного ВВ. При поддержке Госгорпромнадзора Украины и Криворожской горнотехнической инспекции промышленные испытания эмульсионного ВВ «Украинит» будут продолжены на шахтах ПАО «КЖРК» и ГП «ВостГОК» (Украина). Заинтересованность в проведении опытно-экспериментальных работ



по применению эмульсионных ВВ проявляют и другие предприятия с развитыми горнодобывающими комплексами [23, 24].

### Выводы

1. Проведенный анализ технических показателей по выполненным расчетам и составленным паспортам БВР при использовании различных ВВ позволил определить рациональный тип ВВ. Это позволяет применить технологическое решение в области проведения горизонтальных выработок буровзрывным способом и способствует повышению безопасности труда рабочих и ресурсосбережению при производстве горных работ. Применение эмульсионного ВВ типа «Украинит-П-СА» позволит уменьшить количество шпуров в забое выработки до 12% по сравнению с использованием ВВ типа «Аммонит №6 ЖВ». Расходы взрывчатых материалов при использовании паспорта БВР при применении ВВ «Украинит-П-СА» уменьшатся до 6%. Эти показатели свидетельствуют о необходимости применения эмульсионного ВВ типа «Украинит-П-СА» при проведении подготовительных и нарезных выработок буровзрывным способом, а также применение на проходческих работах высокопроизводительного проходческого оборудования.

2. Для обеспечения уходки за цикл не менее 3,3–3,5 м, кроме производительного самоходного оборудования, возникает потребность в новых конструкциях призматических врубов, надежность работы которых по образованию качественной (чистой) врубовой полости достигает 0,95–1,0. Разработано семь вариантов новых конструкций призматических врубов. Особенность разработанных призматических врубов заключается в обеспечении каждой его конструкции достаточным компенсационным объемом (скважины различных диаметров от 65 до 105 мм) для работы шпуровых врубовых зарядов на разрушение трапецевидных перегородок с коэффициентом компенсационного объема от 2,5 до 1,34.

3. Применение предложенного ВВ при проведении горизонтальных выработок в условиях ЧАО «ЗЖРК» позволит снизить себестоимость проведения 1 м подготовительных выработок до 11%. Ожидаемый экономический эффект, полученный в результате технико-экономического сравнения по основным статьям калькуляции расходов, свидетельствует о целесообразности внедрения разработанного технологического решения.

### Список литературы

1. Добыча и переработка урановых руд в Украине: монография / под общ. ред. А.П. Чернова. Киев: АДЕФ-Украина, 2001. 238 с.
2. Кутузов Б.Н., Белин В. А. Проектирование и организация взрывных работ. М.: МГТУ, 2011. 410 с.
3. Сивенков В.И., Иляхин С.В., Маслов И.Ю. Эмульсионные взрывчатые вещества и неэлектрические системы инициирования. М.: Щит-М, 2013. 320 с.
4. Взрывное разрушение горных пород при освоении недр / Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Викторов С.Д., Жариков И.Ф., Закалинский В.М. // Проблемы недропользования. 2014. № 3. С. 80–95.
5. Gorova, A., Kolesnyk, V., & Myronova, I. Increasing of environmental safety level during underground mining of iron ores. *Mining of Mineral Deposits*, 2014, 8(4), 473–479. <http://doi.org/10.15407/mining08.04.473>
6. Mironova I., & Borysovs'ka O. Defining the parameters of the atmospheric air for iron ore mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 2014, 333–339. <http://doi.org/10.1201/b17547-57>
7. Myronova I. The level of atmospheric pollution around the iron-ore mine. *New Developments in Mining Engineering*, 2015, 193–197. <http://doi.org/10.1201/b19901-35>
8. Kholodenko T., Ustimenko Y., Pidkamenna L., & Pavlychenko A. Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 2014, 255–260. <http://doi.org/10.1201/b17547-45>
9. Kholodenko T., Ustimenko Y., Pidkamenna L., & Pavlychenko A. Technical, economic and environmental aspects of the use of emulsion explosives by ERA brand in underground and surface mining. *New Developments in Mining Engineering*, 2015, 211–219. <http://doi.org/10.1201/b19901-38>
10. Khomenko O., Kononenko M., Myronova I., & Savchenko M. Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, 2019, 123, 01039. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
11. Иляхин С.В., Норов А.Ю., Якшибаев Т.М. Определение радиуса зон трещинообразования горного массива при камуфлетном взрыве // Взрывное дело. 2016. № 116/73. С. 29–36.
12. Развитие схем контурного взрывания для проходки подземных горных выработок / Оверченко М.Н., Мозер С.П., Галушко Ф.И., Луньков А.Г. // Взрывное дело. 2016. № 115/72. С. 202–214.
13. Гринев В.Г., Хорольский А.А. Система поддержки принятия решений при разработке месторождений полезных ископаемых // Горно-геологический журнал. 2017. 51(3). С. 18–24.
14. Хорольский А.А., Гринев В.Г. Выбор сценария освоения месторождений полезных ископаемых // Геология и охрана недр. 2018. (3), 68–75.
15. Разрушение горных пород взрывом / Н.Р. Шевцов, П.Я. Таранов, В.В. Левит, А.Г. Гудзь. Донецк: ДонНТУ, 2003. 253 с.
16. Меркулов А.В., Сильченко Ю.А., Скориков В.А. Проектирование паспортов буровзрывных работ



- при проходке горных выработок. Новочеркасск: Шахтинский институт ЮРГТУ, 2003. 90 с.
17. Оника С.Г., Стасевич В.И., Ковалева И.М. Разрушение горных пород взрывом. Минск: БНТУ, 2016. 168 с.
  18. Khomenko O., Rudakov D., & Kononenko M. Automation of drill and blast design. *Technical and Geoinformational Systems in Mining*, 2011, 271–275. <http://doi.org/10.1201/b11586-45>
  19. Хоменко О.Є., Кононенко М.М., Савченко М.В. Технологія підземної розробки рудних родовищ. М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 449 с. <http://doi.org/10.33271/dut.001>
  20. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Кононенко М.Н. Обоснование параметров буровзрывной проходки горизонтальных горных выработок с подчищающими зарядами взрывчатых веществ в опережающих скважинах вруба // Горные науки и технологии. 2020, 5(4), 336–348. <http://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-336-348>.
  21. Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M., & Kovalenko I. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 2019, 13(3), 22–30. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.022>
  22. Lyashenko V., Vorob'ev A., Nebolin V., Vorob'ev K. Improving the efficiency of blasting operations in mines with the help of emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 2018, 12(1), 95–102. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.095>
  23. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., & Kislyi P.A. Improving of seismic safety of rocky deposits underground mining based on new charges of explosives application. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2019, 75(8), 912–922. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-8-912-922>
  24. Повышение эффективности проходки подземных горных выработок с использованием шпуровых зарядов с кумулятивным эффектом / Умаров Ф.Я., Насилов У.Ф., Нутфуллоев Г.С., Назаров З.С., Шарипов Л.О. // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 3. С. 15–23. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-15-23.
  4. Trubetskoy K.N., Zakharov V.N., Viktorov S.D., Zharikov I.F., Zakalinsky V.M. Explosive destruction of rocks during the development of subsoil. *Problemy nedropolzovaniya [Problems of Subsoil Use]*, 2014, no. 3, pp. 80–95. (In Russ.)
  5. Gorova A., Kolesnyk V., Myronova I. Increasing of environmental safety level during underground mining of iron ores. *Mining of Mineral Deposits*, 2014, 8(4), 473–479. <http://doi.org/10.15407/mining08.04.473>
  6. Mironova I., Borysovs'ka O. Defining the parameters of the atmospheric air for iron ore mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 2014, 333–339. <http://doi.org/10.1201/b17547-57>
  7. Myronova I. The level of atmospheric pollution around the iron-ore mine. *New Developments in Mining Engineering*, 2015, 193–197. <http://doi.org/10.1201/b19901-35>
  8. Kholodenko T., Ustimenko Y., Pidkamenna L., Pavlychenko A. Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 2014, 255–260. <http://doi.org/10.1201/b17547-45>
  9. Kholodenko T., Ustimenko Y., Pidkamenna L., Pavlychenko A. (2015). Technical, economic and environmental aspects of the use of emulsion explosives by ERA brand in underground and surface mining. *New Developments in Mining Engineering*, 2015, 211–219. <http://doi.org/10.1201/b19901-38>
  10. Khomenko O., Kononenko M., Myronova I., Savchenko M. Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, 2019, 123, 01039. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
  11. Ilyakhin S.V., Norov A.Yu., Yakshibaev T.M. Determination of the radius of the rock mass crack formation zones during a camouflet explosion. *Vzryvnoe delo [Explosion Technology]*, 2016, no. 116/73, pp. 29–36. (In Russ.)
  12. Overchenko M.N., Mozer S.P., Galushko F.I., Lunkov A.G. Development of presplit blasting schemes for driving underground workings. *Vzryvnoe delo [Explosion Technology]*, 2016, no. 115/72, pp. 202–214. (In Russ.)
  13. Grinev V.G., Khorolsky A.A. A decision support system for the development of mineral deposits. *Gorno-geologicheskii zhurnal [Mining and Geological Journal]*, 2017, 51 (3), pp. 18–24. (In Russ.)
  14. Khorolsky A.A., Grinev V.G. The choice of a scenario for the development of mineral deposits. *Geologiya i okhrana neдр [Geology and Protection of Mineral Resources]*, 2018, (3), pp. 68–75. (In Russ.)
  15. Shevtsov N.R., Taranov P.Ya., Levit V.V., Gudzh A.G. Razrushenie gornykh porod vzryvom [The destruction of rocks by the explosion]. Donetsk: DonNTU, 2003, 253 p. (In Russ.)
  16. Merkulov A.V., Silchenko Yu.A., Skorikov V.A. Proektirovanie pasportov burovzryvnykh rabot pri

## References

1. Chernov A.P. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud v Ukraine: monografiya [Mining and processing of uranium ores in Ukraine: Monograph]*. Kiev: ADEF-Ukraine, 2001, 238 p. (In Russ.)
2. Kutuzov B.N., Belin V.A. *Proektirovanie i organizatsiya vzryvnykh rabot [Design and organization of blasting operations]*. Moscow: Sholokhov Moscow State University for Humanities, 2011, 410 p. (In Russ.)
3. Sivenkov V.I., Ilyakhin S.V., Maslov I.Yu. *Emulsionnye vzryvchatye veshchestva i neelektricheskie sistemy initsirovaniya [Emulsion explosives and non-electric detonation systems]*. Moscow: Shchit-M, 2013, 320 p. (In Russ.)

- prokhodke gornykh vyrabotok [Designing of blasting patterns during mining operations]. Novocherkassk: Shakhty Institute of SRSTU, 2003, 90 p. (In Russ.)
17. Onika S.G., Stasevich V.I., Kovaleva I.M. Razrushenie gornykh porod vzryvom [Destruction of rocks by explosion]. Minsk: BNTU, 2016, 168 p. (In Russ.)
  18. Khomenko O., Rudakov D., Kononenko M. Automation of drill and blast design. Technical and Geoinformational Systems in Mining, 2011, 271–275. <http://doi.org/10.1201/b11586-45>
  19. Khomenko O.E., Kononenko M.M., Savchenko M.V. Tekhnologiya podzemnoy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy [Technology of underground mining of ore deposits]. Dnipro: NTU DP, 2018, 449 p. <http://doi.org/10.33271/dut.001>
  20. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Kononenko M.N. Substantiation of parameters of mine working drive with blasting technique and cleaning charges in advance cutting holes. Gornye nauki i tekhnologii [Mining Science and Technology], 2020, vol. 5, no. 4, pp. 336–348. <http://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-336-348>
  21. Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M., Kovalenko I. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. Mining of Mineral Deposits, 2019, 13(3), 22–30. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.022>
  22. Lyashenko V., Vorob'ev A., Nebolin V., Vorob'ev K. Improving the efficiency of blasting operations in mines with the help of emulsion explosives. Mining of Mineral Deposits, 2018, 12(1), 95–102. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.095>
  23. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Kislyi P.A. Improving of seismic safety of rocky deposits underground mining based on new charges of explosives application. Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information, 2019, 75(8), 912–922. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-8-912-922>
  24. Umarov F.Ya., Nasirov U.F., Nutfulloev G.S., Nazarov Z.S., Sharipov L.O. Increasing the efficiency of driving underground mine workings using blast-hole charges with a cumulative effect. Izvestiya vuzov. Gorny zhurnal. [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal.], 2020, no. 3, pp. 15–23. DOI: 10.21440 / 0536-1028-2020-3-15-23

Поступила 03.04.2021; принята к публикации 26.04.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 03/04/2021; revised 26/04/2021; published 27/09/2021

**Хоменко Олег Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор кафедры горной инженерии и образования, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина.  
Email: rudana.in.ua@gmail.com

**Кононенко Максим Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры горной инженерии и образования, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина.  
Email: kmn211179@gmail.com

**Ляшенко Василий Иванович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела, Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, Желтые Воды, Украина.  
Email: vilyashenko2017@gmail.com

**Oleg E. Khomenko** – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Mining Engineering and Education, National Technical University Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.  
Email: rudana.in.ua@gmail.com

**Maksim N. Kononenko** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mining Engineering and Education, National Technical University Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.  
Email: kmn211179@gmail.com

**Vasiliy I. Lyashenko** – PhD (Eng.), Senior Researcher, Head of the Research Department, State Enterprise Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine.  
Email: vilyashenko2017@gmail.com



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-16-23

## ОПЫТ ШАХТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ РУД

Голик В.И.<sup>1,2</sup>, Разоренов Ю.И.<sup>1</sup>, Мицик М.Ф.<sup>3</sup>, Якшина В.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет, Новочеркасск, Россия

<sup>2</sup>Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ, Россия

<sup>3</sup>Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, Шахты, Россия

<sup>4</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Стратегией повышения эффективности горнодобывающей отрасли России может быть диверсификация производства на технологии выщелачивания металлов как альтернатива традиционным технологиям с потерей некондиционного сырья. Исследование эффективности подземного выщелачивания осуществляется комплексным методом, включающим оценку качества дробления руды и параметров извлечения металлов из руд в производственный раствор с проходкой контрольных выработок для количественного подтверждения. Промышленными многолетними экспериментами доказана возможность извлечения металлов из некондиционного сырья не только с уменьшением потерь, но и с приращением запасов за счет металлосодержащего сырья. Рассмотрены вопросы диверсификации горного производства на технологии выщелачивания металлов на основе систематизации и детализации опыта практики применения технологий с выщелачиванием металлов в подземных шахтных блоках. Сделан вывод, что для расширения диапазона применения технологии выщелачивания традиционная технология подготовки руды к извлечению металлов на месте залегания нуждается в обеспечении нужного гранулометрического состава, равномерной плотности размещения руд в магазине, создании условий для фильтрации потоков выщелачивающих растворов и предупреждения потерь производственных растворов. Полученные закономерности физико-химических процессов выщелачивания в подземных блоках, штабелях на земной поверхности и в активаторах цехов гидрометаллургических производств могут быть применены при добыче металлов из химически вскрываемого металлосодержащего сырья. Конверсия и диверсификация горного производства нуждаются в разработке научных основ выщелачивания, включающих повышение извлечения из руд, обеспечение нужного гранулометрического состава, интенсификацию процесса и др. Для этого могут быть востребованы результаты обобщения ранее выполненных в России и дальнем зарубежье теоретических и экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** диверсификация, выщелачивание металлов, подземные блоки, металлы, руды, дробление, извлечение металлов, раствор реагентов.

*Статья выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-3602.2021.1.5.*

© Голик В.И., Разоренов Ю.И., Мицик М.Ф., Якшина В.В., 2021

### Для цитирования

Опыт шахтного выщелачивания металлов из руд / Голик В.И., Разоренов Ю.И., Мицик М.Ф., Якшина В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 16–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-16-23>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## EXPERIENCE IN MINE LEACHING OF METALS FROM ORES

Golik V.I.<sup>1,2</sup>, Razorenov Yu.I.<sup>1</sup>, Mitsik M.F.<sup>3</sup>, Yakshina V.V.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

<sup>2</sup>North Caucasus State Technological University, Vladikavkaz, Russia

<sup>3</sup>Institute of the Service Sector and Entrepreneurship (branch) of DSTU, Shakhty, Russia

<sup>4</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The strategy for increasing efficiency of the mining industry in Russia can be a diversification of production using metal leaching technologies, as an alternative to conventional technologies with the loss of substandard raw materials. Efficiency of in-situ leaching is studied by an integrated method, including an assessment of the quality of ore crushing and the parameters of metal extraction from ores into a production solution with driving reference workings for quantitative confirmation. Long-term industrial experiments have proved the possibility of extracting metals from substandard raw materials not only with a decrease in losses, but also with an increase in reserves due to metal-containing raw materials. The issues of the diversification of mining production based on the technology of metal leaching are considered by systematizing and detailing of the experience in a practical application of technologies with the leaching of metals in underground mine blocks. It is concluded that in order to expand the range of application of the leaching technology, the conventional technology of ore preparation for the extraction of metals in situ needs to ensure the desired particle size distribution, uniform density of ore distribution in the shrinkage stope, create conditions for filtrating leaching solution flows and prevent losses of production solutions. The obtained regularities of physicochemical processes of leaching in underground blocks, stacks above ground and in activators of hydrometallurgical plants can be used in the extraction of metals from chemically opened metal-containing raw materials. Conversion and diversification of mining production requires the development of a scientific basis for leaching, including increasing extraction from ores, ensuring the required particle size distribution, intensifying the process, etc. Thus, generalized theoretical and experimental findings obtained in Russia and abroad may be highly useful.

**Keywords:** diversification, metal leaching, underground blocks, metals, ores, crushing, metal extraction, reagent solution.

*The article was made with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation MD-3602.2021.1.5.*

### For citation

Golik V.I., Razorenov Yu.I., Mitsik M.F., Yakshina V.V. Experience in Mine Leaching of Metals from Ores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 16–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-16-23>

### Введение

С древних времен до вхождения в капиталистический период развития минеральные ресурсы осваивались медленными темпами при минимальной вооруженности процессов добычи и переработки. Период строительства современного общества отличается многократным увеличением объема горного производства ускоренными темпами за счет развития интенсивных технологий с резким увеличением разубоживания руд при добыче и потере металлов при обогащении. Как попытка улучшить качество руд, появились технологии с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями [5].

Экономические реформы 90-х годов прошлого века в России уменьшили производство стратегических металлов, таких как вольфрам, молибден, олово, свинец, цинк и др., поэтому при относительно хорошей сырьевой базе существует проблема обеспечения металлургического производства сырьем. Ситуация обострилась, потому что конъюнктура сырья способствует

выборочной добыче наиболее ценного сырья, переводя в категорию неактивных другие рудные компоненты [10, 11, 24].

Россия добывает 48 наименований минеральных ресурсов, в то время как большинство стран добывает не более 10. Доля России в мировом производстве достигает 10%, что позволяет занимать третье место после США и Китая.

Главными причинами ослабления сырьевой базы российской горнодобывающей отрасли является снижение темпов разведки месторождений, высокие затраты на содержание инфраструктуры в некомфортных для жизни районах, высокие затраты на транспортирование сырья и экспорт в виде сырья, например, 90% меди и олова, 65% цинка [7, 9, 19]. В последние годы внутреннее потребление минеральных ресурсов снизилось на порядок, добыча меди, титана, вольфрама, молибдена сократилась, например редкоземельных металлов на 90%. Степень освоения ресурсов составляет, %: по меди – 49, цинку – 17, олову – 42, молибдену – 32.



Стратегией выживания экономики может быть диверсификация горных отраслей на технологии выщелачивания металлов, в том числе из некондиционных руд, как альтернатива технологиям с открытым выработанным пространством [8, 18, 21]. Для использования таких технологий в большей мере пригодны руды цветных металлов, обеспечивая уменьшение себестоимости металлов в 5–10 раз.

В горных выработках создаются благоприятные условия для выщелачивания ранее теряемых руд. Процесс выщелачивания осуществляется природой постоянно. Этот феномен можно использовать для добычи металлов в рамках универсальной технологии извлечения металлов подземным, кучным и иными способами.

Об извлечении металлов из руд выщелачиванием известно с XVI века (Испания). Широкое промышленное освоение его связано с добычей меди на руднике «Кананея» в Мексике (1924 г.) и на Урале (30–40 г. прошлого века). В настоящее время подземное выщелачивание применяется для добычи цветных металлов в США, России, Франции, Японии, Австралии, ФРГ и других странах.

В России опытно-промышленные испытания технологии были начаты на Блявинском руднике Медногорского медно-серного комбината в 1971 г. В то же время предпринята попытка промышленно выщелачивать полиметаллы на Фиагдонском руднике (Республика Северная Осетия – Алания).

В последующее время подземное выщелачивание широко применяется для добычи металлов в США, СССР, Франции, Японии, Австралии, ФРГ и других странах. Еще в 1974 г. этим методом было получено 20% мировой добычи меди, а сегодня его доля в мировом производстве некоторых полезных ископаемых достигает 80%. Только в США подземным выщелачиванием ежегодно добывают 300 тыс. т меди и 4 тыс. т урана.

Состояние сырьевой базы металлов для промышленности с 1991 г. ухудшилось, в связи с чем актуальность вовлечения в отработку бедных руд повысилась. Учитывая наличие в отработанных рудных полях забалансовых руд, основным направлением исследований может быть разработка научных основ применения горно-технических систем выщелачивания проблемных руд. Состояние сырьевой базы металлов для промышленности с 1991 г. ухудшилось. В связи с этим приобретает актуальность вовлечение в отработку бедных и некондиционных руд.

Учитывая наличие в отработанных рудных полях забалансовых и потерянных руд, основным направлением исследований может быть разработка научных основ применения горно-технических систем выщелачивания из про-

блемных руд металлов, в первую очередь золота цинка и урана. Цель достигается путем детализации имеющихся данных о технологиях с выщелачиванием с учетом индивидуальных особенностей руд: обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований с использованием методов математического планирования эксперимента и средств информационных технологий.

### Постановка проблемы

Основными вопросами разработки месторождений являются технологическая возможность, экономическая целесообразность и экологическая безопасность. Для их решения требуется обоснование параметров ориентированной на новые процессы технологии. Вовлечение в отработку месторождений полезных ископаемых, разработка которых традиционными горными способами нерентабельна, позволяет расширить сырьевую базу промышленности. Несомненными преимуществами метода являются его экономичность, относительно большая безопасность, снижение нагрузки на окружающую среду.

Широкому внедрению нового метода препятствует недостаточная изученность процесса, поэтому основной проблемой является разработка научных основ слагающих компонент: горных работ, химико-технологических процессов, гидравлики и гидрогеологии.

Главная задача – извлечение металлов из недр с наименьшими потерями и затратами – решается оптимизацией процессов строительства вскрывающих, подготовительных выработок и определенный порядок их эксплуатации, увязанный во времени и пространстве с управляемым химико-технологическим процессом переноса полезного компонента из руды в раствор. Решающим фактором, от которого зависит полнота и время извлечения полезного компонента из руд и экономическая эффективность технологии является качество дробления руды. Наиболее благоприятными являются куски руды класса +0–50 мм, а наличие фракции +200 мм дискредитирует технологию. Не менее важной задачей является равномерность уплотнения магазинируемой в блоке руды. Компенсационное пространство формируется за счет частичного выпуска отбитой руды, при этом руда разрыхляется только в пределах эллипсоида, а в остальном объеме остается неподвижной.

При выщелачивании скальных руд распространена инфильтрационная схема движения. Раствор реагента от оросителей к приемникам движется под действием гравитации, не заполняя пустоты между кусками руды, а лишь по-



крывая их пленкой, что затрудняет равномерность орошения. Кинетика капиллярного выщелачивания руд определяется взаимной диффузией растворителя и металлосодержащего раствора, чем обоснована необходимая степень предварительного дробления руд. В процессе извлечения металлов из руды спустя время процесс замедляется и возникает необходимость его интенсификации путем воздействия на выщелоченную массу физическими, химическими и биологическими методами.

Проблему разработки месторождений подземным выщелачиванием формируют следующие вопросы: повышение доли извлечения из руды на месте залегания, повышенные требования к granulometric composition, равномерность уплотнения руды, защита внешней среды от утечек растворов, интенсификация процесса и др.

### Методология

Исследование эффективности подземного выщелачивания осуществляется комплексным методом, включающим оценку качества дробления руды и параметров извлечения металлов из руд в продукционный раствор при завершении инфильтрации выщелачивающих растворов [2, 3, 22].

Оценка качества взрывного дробления руды осуществляется методом фотопланиметрии на этапах подготовки к выщелачиванию с подсчетом габаритных для выщелачивания фракций.

Полнота извлечения металлов в раствор определяется систематическим определением концентрации металлов в растворе с фиксацией результатов для системного анализа с построением базовых уравнений кинетики выщелачивания. После выщелачивания руды для установления полноты выщелачивания по замагистинированной руде проходятся контрольные выработки с отбором проб и лабораторными определениями неизвлеченного металла. По разнице исходного и конечного содержания металлов в руде определяется полнота извлечения металлов для каждой фракции руды [14, 16, 17].

### Обсуждение

Система с выщелачиванием магистинированной руды применялась на урановом руднике «Брюжо». Блок шахтного подземного выщелачивания был подготовлен двумя восстающими, пройденными на расстоянии 30 м один от другого, и откаточным штреком, над которым был оставлен предохранительный целик толщиной 4,5 м. Руду отбивали взрыванием зарядов в шпурах. Рабочий раствор реагента подавался сверху, просачивался по инфильтрационной схеме и принимался сборником растворов (рис. 1).

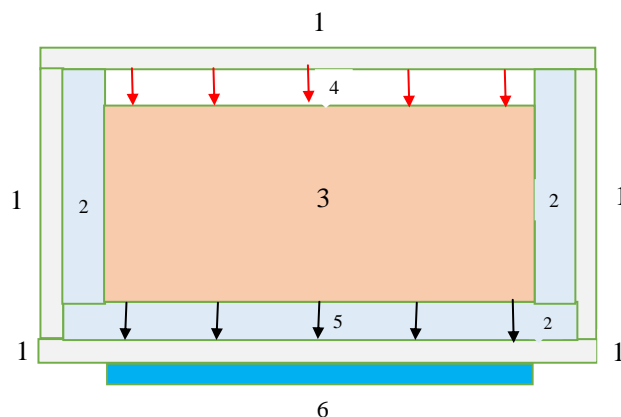


Рис. 1. Выщелачивание руды в магазине:

1 – подготовительные выработки; 2 – целики; 3 – руда; 4 – рабочий раствор реагента; 5 – продукционный раствор реагента; 6 – сборник растворов

Fig. 1. Leaching of ore in the shrinkage stope:

1 is preparatory workings; 2 is pillars; 3 is ore; 4 is a treatment reagent solution; 5 is a product reagent solution; 6 is a collecting tank for solutions

Опытно-промышленный блок отработан на месторождении Заозерное (Северный Казахстан) в крепких слоистых породах. Магазин формировали с отбойкой руды скважинами из подэтажных штреков. Рабочий раствор реагента просачивался по инфильтрационной схеме и принимался сборником растворов на нижнем штреке (рис. 2).

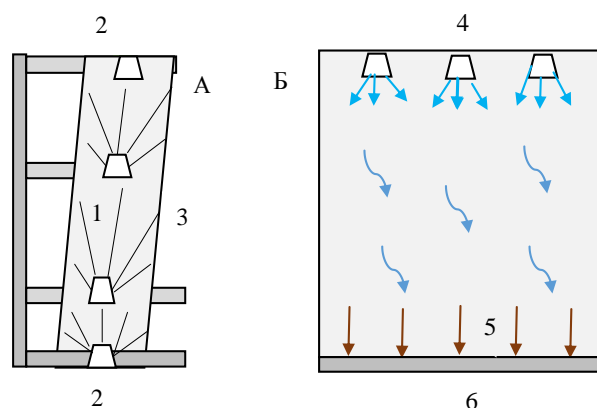


Рис. 2. Механизм выщелачивания руды в опытном блоке: А – подготовка блока и отбойка руды;

Б – движение реагентов; 1 – руда; 2 – подготовительные выработки; 3 – взрывные скважины; 4 – подача выщелачивающих растворов; 5 – сбор продукционных растворов

Fig. 2. An ore leaching procedure in the pilot block:

A is block preparation and ore breaking; B is movement of reagents; 1 is ore; 2 is preparatory workings; 3 is blast holes; 4 is supply of leaching solutions; 5 is collection of product solutions

Технология с этажным принудительным обрушением наиболее перспективна для разработки мощных трещиноватых рудных залежей, не склонных после дробления к слеживанию. Решающее значение приобретает размер рудного куска, зависящий от способа отбойки и дробления. Технология с этажным принудительным обрушением рудного массива на компенсационное пространство применена на урановом месторождении Целинного горно-химического комбината, балансовые запасы которого были отработаны системой слоевого обрушения. Выщелачивали забалансовые руды, расположенные на двух горизонтах с высотой этажа 40 м.

Так же было отработано и другое урановое месторождение Целинного горно-химического комбината в лейкократовых гранит-порфирах с коэффициентом крепости 8–15 по М.М. Протодьяконову. Нижнюю подсечку образовали взрыванием зарядов в нисходящих скважинах из выработок верхнего горизонта и в концах дренажных скважин с горизонта откатки.

Технология с подэтажным обрушением руды на компенсационное пространство применена на урановом месторождении «Восток» (Северный Казахстан, Целинный горно-химический комбинат) при крепости пород 10–12. Отбойку начали по завершении разделки отрезной щели и отбойки нижнего компенсационного подэтажа. Руду выпускали так, чтобы коэффициент ее разрыхления был 1,1–1,15.

Результаты контрольных вскрытий выщелоченных рудных массивов сводятся к следующему:

- удовлетворительное дробление обеспечивается лишь в зонах фигур выпуска;
- запасы междуштрековых целиков дробятся на крупные обломки размерами более 300 мм;
- прилегающие к бортам камер запасы практически не подвергаются дроблению.

В большинстве случаев неудовлетворительное дробление руд дискредитирует систему разработки и сам метод выщелачивания. При всех вариантах для увеличения скорости выщелачивания применяют методы интенсификации процесса [6, 13, 23].

Возможности химических способов интенсификации ограничены. Так, увеличение концентрации растворов кислот и щелочей выше 5–8% практически не увеличивает скорость выщелачивания, а приводит к интенсивному выщелачиванию вмещающих пород. К химическим способам относят и окисление руд кислородом.

Биологические способы интенсификации выщелачивания более эффективны, чем химиче-

ские. Путем адаптации с использованием мутантных факторов получают культуры, обеспечивающие большую скорость выщелачивания бактерий.

Физические способы интенсификации процессов выщелачивания обеспечивают увеличение скорости за счет активизации процессов окисления, уменьшения крупности руд и т.п., что используют при кучном и подземном выщелачивании. Термическое воздействие увеличивает скорость выщелачивания в 2–3 раза при повышении температуры среды до +35°C при бактериальном выщелачивании и 75–80°C при химическом выщелачивании.

При воздействии электрическим током низкого напряжения скорость выщелачивания, например, меди увеличивается в 2–3 раза. Воздействие тока высокой частоты на сульфидные руды повышает скорость выщелачивания в 5–6 раз.

Основой наиболее часто применяемого механического способа интенсификации является перемещение кусков частично выщелоченной руды взрывной волной, механизмами и машинами. Эффективность интенсификации процессов выщелачивания интерпретируется графиком (рис. 3).

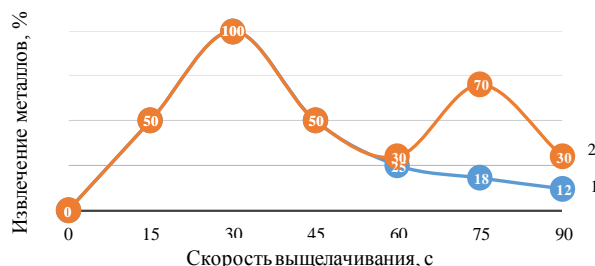


Рис. 3. Интенсификация процесса выщелачивания металлов: 1 — простое выщелачивание; 2 — выщелачивание с интенсификацией взрывом  
Fig. 3. Intensification of the metal leaching process: 1 is simple leaching; 2 is explosive intensification leaching

Эффект взрывания в обсаженных скважинах невелик ввиду значительного объема пустот в отбитой руде, причем размеры пустот сравнимы с размерами взрывааемых зарядов и воздействие наблюдалось в зоне радиусом в несколько диаметров заряда. Эффективность ударного воздействия можно повысить созданием условий для прохождения волн напряжений, например заполнением пустот жидкостью.

Реализация перспектив шахтного выщелачивания в блоках связана с совершенствованием смежных разделов горного производства, определяющих эффективность выщелачивания металлов из руд [1, 4, 12, 15].

## Заключение

В условиях ослабления сырьевой базы горнодобывающей отрасли важным элементом стратегии выживания экономики может быть конверсия на технологии выщелачивания металлов, в том числе из некондиционных руд, как альтернатива традиционным технологиям.

Конверсия и диверсификация горного производства нуждаются в разработке научных основ выщелачивания металлов, включающих повышение доли извлечения из руд на месте залегания, обеспечение нужного гранулометрического состава, интенсификацию процесса и др.

Для достижения поставленной цели могут быть востребованы результаты обобщения ранее выполненных в России и дальнем зарубежье теоретических и экспериментальных исследований.

## Список литературы

- Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory // *International Journal of GEOMATE*, 2016, 10 (1), pp. 1693–1697.
- Lyashenko V.I., Dudchenko A.H., Rakhmanov R.A. Scientific and methodological support and technical maintenance for drilling and blasting preparation of rock ores for underground block leaching // *Scientific and technical journal "Explosion Technology"*. 2020. №127/84, pp. 102–134.
- Босиков И.И., Клюев Р.В. Методы системного анализа природно-промышленной системы горно-металлургического комплекса. Владикавказ, 2015. 124 с.
- Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Ганин М.П. Экологический концепт природного выщелачивания металлических руд // *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2019. Выпуск 2. С. 16–26.
- Управление свойствами твердеющих смесей при закладке выработанного пространства рудных месторождений / Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комашенко В.И., Качурин Н.М. // *Записки Горного института*. 2020. 243. С. 283–285.
- Эффективность комбинирования технологий выемки руд в пределах рудного поля / Голик В.И., Лукьянов В.Г., Качурин Н.М., Стась Г.В. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 10. С. 32–39.
- Голик В.И., Разоренов Ю.И., Каргинов К.Г. Основа устойчивого развития РСО – Алания – горнодобывающая отрасль // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2017. Т. 9. № 2 (32). С. 163–171.
- Голик В.И., Цидаев Б. С., Логачев А.В. Повышение рентабельности добычи нефти путем диверсификации технологий // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2019. Т. 11. №1(39). С. 98–104.
- Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н. АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – путь длиной в 65 лет // *Горный журнал*. 2016. № 3. С. 6–12.
- Минерально-сырьевая база цветной металлургии России / Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х., Харебов Г.Х. // *Вектор ГеоНаук*. 2019. Т. 2. № 1. С. 9–18.
- Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр Земли // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. № 4 (специальный выпуск № 15). С. 5–11.
- Комашенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. Вып. 2. 2016. С. 95–101.
- Отбойка руд скважинными зарядами модернизированной конструкции / Комашенко В.И., Дзапаров В.Х., Дзеранов Б.В., Стась Г.В. // *Вектор ГеоНаук*. 2019. Т. 2. № 3. С. 40–46.
- Выщелачивание полиметаллических руд сернохлорно-хлоридными растворами с добавкой некоторых реагентов / Кондратьев Ю.И., Кондратьева И.Ю., Мирецкий А.В., Малиева З.В. // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2006. № 4. С. 34–37.
- Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход / В.С. Бригида, Х.Х. Кожиев, А.А. Сарян, А.К. Джиеова // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 4. С. 20–32. DOI: 10.25018/0236-14932020-4-0-20-32.
- Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания / Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Бетров З.С., Залишвили В.Б. // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2016. №1. С. 46–49.
- Briggs D. Recovery of copper by solution mining methods. Tucson: Arizona Geological Survey, 2015. 109 p.
- Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37. No. 2. Pp. 73–119.
- Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology // *Advances in Computer Science and Engineering*. AISC 141. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, pp. 77–83.
- MacCarthy J., Nosrati A., Skinner W., Addai-Mensah J. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore // *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 160. Pp. 26–37.
- Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations // *SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference–Mining: Navigating the Global Waters*. Denver, United States. 2015. Pp. 529–532.



22. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach // Proceedings of the 3rd International Conference on Heap Leach Solution, 2015. Lima, pp. 123–130.
23. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. 2015. T. 157. Pp. 306–324.
24. Новый подход для оценки эффективности работы горно-обогатительных комбинатов / Мельников И.Т., Гавришев С.Е., Михайлов А.Г., Пыталев И.А., Швецов Н.С., Васильев К.П. // Горная промышленность. 2012. № 5(105). С. 60–66.

## References

1. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. International Journal of GEOMATE, 2016, 10 (1), pp. 1693–1697.
2. Lyashenko V.I., Dudchenko A.H., Rakhmanov R.A. Scientific and methodological support and technical maintenance for drilling and blasting preparation of rock ores for underground block leaching. Scientific and technical journal “Explosion Technology”, 2020, no. 127/84, pp. 102–134.
3. Bosikov I.I., Klyuev R.V. System analysis methods for the natural and industrial system of the mining and metallurgical complex. Vladikavkaz, 2015, 124 p. (In Russ.)
4. Golik V.I., Burdzieva O.G., Ganin M.P. An ecological concept of natural leaching of metal ores. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle* [Proceedings of Tula State University. Geosciences], 2019, no. 2, pp. 16–26. (In Russ.)
5. Golik V.I., Dmitrak Yu. V., Komashchenko V.I., Kachurin N.M. Management of the properties of hardening mixtures, when filling the mined-out space of ore deposits. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute], 2020, vol. 243, pp. 283–285. (In Russ.)
6. Golik V.I., Lukyanov V.G., Kachurin N.M., Stas G.V. Efficiency of combining ore mining technologies within the ore field. *Izvestiya Tomskogo politeknicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering], 2020, vol. 331, no. 10, pp. 32–39. (In Russ.)
7. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Karginov K.G. The basis for sustainable development of North Ossetia-Alania is the mining industry. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2017, vol. 9, no. 2 (32), pp. 163–171. (In Russ.)
8. Golik V.I., Tsidaev B.S., Logachev A.V. Increasing the profitability of oil production by diversifying technologies. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2019, vol. 11, no. 1 (39), pp. 98–104. (In Russ.)
9. Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. JSC Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology: a path for 65 years. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2016, no. 3, pp. 6–12. (In Russ.)
10. Dmitrak Yu.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.Kh. Mineral resources base of non-ferrous metallurgy in Russia. *Vektor GeoNauk* [Vector of GeoSciences], 2019, vol. 2, no. 1, pp. 9–18. (In Russ.)
11. Kaplunov D.R., Rynnikova M.V., Radchenko D.N. Scientific and methodological foundations of designing an ecologically balanced cycle of integrated development and conservation of the Earth's interior. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2015, no. 4 (special issue no. 15), pp. 5–11. (In Russ.)
12. Komashchenko V.I., Vasiliev P.V., Maslennikov S.A. A reliable raw material base is for underground mining of the KMA deposits. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Geosciences], 2016, no. 2, pp. 95–101. (In Russ.)
13. Komashchenko V.I., Dzaparov V.Kh., Dzeranov B.V., Stas G.V. Breaking of ores with modernized borehole charges. *Vektor GeoNauk* [Vector of GeoSciences], 2019, vol. 2, no. 3, pp. 40–46. (In Russ.)
14. Kondratiev Yu.I., Kondratieva I.Yu., Miretsky A.V., Malieva Z.V. Leaching of polymetallic ores with sulfuric acid-chloride solutions with the addition of some reagents. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy], 2006, no. 4, pp. 34–37. (In Russ.)
15. Brigida V.S., Kozhiev Kh.Kh., Saryan A.A., Dzhioeva A.K. Spatiotemporal objectives of geoecology: an interdisciplinary approach. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2020, no. 4, pp. 20–32. DOI: 10.25018/0236-14932020-4-0-20-32.
16. Khulelidze K.K., Kondratiev Yu.I., Betzov Z.S., Zaalishvili V.B. Assessment of primary and technogenic deposits in North Ossetia-Alania as possible objects of the application of the underground and heap leaching technology. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2016, no. 1, pp. 46–49. (In Russ.)
17. Briggs D. Recovery of copper by solution mining methods. Tucson: Arizona Geological Survey, 2015. 109 p.
18. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology - current state, innovations, and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016, vol. 37, no. 2, pp. 73–119.
19. Haifeng Wang, Yaquin He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of mineral processing engineering education in China University of Mining and Technology. *Advances in Computer Science and Engineering*. AISC 141. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, pp. 77–83.
20. MacCarthy J., Nosrati A., Skinner W., Addai-Mensah J. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*. 2016, vol. 160, pp. 26–37.
21. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations. SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference – Mining: Navigating the Global Waters. Denver, United States, 2015, pp. 529–532.
22. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide / supergene and sulfide heap

- leach. Proceedings of the 3rd International Conference on Heap Leach Solution, 2015. Lima, pp. 123–130.
23. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. Hydrometallurgy. 2015, vol. 157, pp. 306–324.
24. Melnikov I.T., Gavrishev S.E., Mikhailov A.G., Pytalev I.A., Shevtsov N.S., Vasiliev K.P. A new approach for evaluating the efficiency of mining and processing plants. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2012, no. 5 (105), pp. 60–66. (In Russ.)

Поступила 08.04.2021; принята к публикации 26.04.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 08/04/2021; revised 26/04/2021; published 27/09/2021

**Голик Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ, Россия, профессор кафедры «Горное дело», Южно-Российский государственный политехнический университет, Новочеркасск, Россия. Email: v.i.golik@mail.ru

**Разоренов Юрий Иванович** – доктор технических наук, профессор, ректор, Южно-Российский государственный политехнический университет, Новочеркасск, Россия. Email: yiri1963@mail.ru

**Мицик Михаил Федорович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и прикладная информатика», Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, Шахты, Россия. Email: m\_mits@mail.ru

**Якшина Виктория Владимировна** – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: v.v.yakshina@inbox.ru

**Vladimir I. Golik** – DrSc (Eng.), Professor, North Caucasus State Technological University, Vladikavkaz, Russia, Professor of the Department of Mining, South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia. Email: v.i.golik@mail.ru

**Yuri I. Razorenov** – DrSc (Eng.), Professor, Rector of South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia. Email: yiri1963@mail.ru

**Mikhail F. Mitsik** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mathematics and Applied Informatics, Institute of Service Sector and Entrepreneurship (branch) of DSTU, Shakhty, Russia. Email: m\_mits@mail.ru

**Viktoria V. Yakshina** – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: v.v.yakshina@inbox.ru



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 622.765  
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-24-36



## СХЕМА И РЕЖИМ ФЛОТАЦИИ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНЫХ РУД

Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),  
Владикавказ, Россия

**Аннотация. Постановка задачи.** При обогащении упорных золотосодержащих руд уменьшение выхода концентрата, направляемого на вскрытие золота и последующее цианирование, значительно сокращает капитальные затраты и эксплуатационные расходы, что обеспечивает решение актуальной задачи повышения экономической эффективности производства товарной продукции. **Цель работы.** Повышение технико-экономических показателей переработки руд за счет уменьшения выхода концентрата, направляемого на биоокисление сульфидов, путем применения аэрации пульпы смесью воздуха с горячим водяным паром – флотации паровоздушными пузырьками. **Новизна.** С опорой на данные о зависимости сил гидрофильного отталкивания и гидрофобного притяжения, обусловленных отличием структуры воды в граничных слоях минералов от структуры воды в объеме, сделан вывод о возможности изменения результатов флотации за счет повышения температуры смачивающей пленки, например путем использования теплоты конденсации водяного пара. С этой целью аэрацию пульпы осуществляют смесью воздуха с горячим водяным паром. Повышение температуры смачивающей пленки является причиной роста сил гидрофильного отталкивания, стабилизирующих пленку, а потеря устойчивости смачивающей пленки связана с ростом сил гидрофобного притяжения. **Результат.** С использованием разработанного стенда и методики проведены измерения коэффициента теплоотдачи при различной концентрации пара в пузырьке воздуха и выявлено, что при массовой доле пара в паровоздушной смеси более  $0,30 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$  за счет теплоты его конденсации температура воды в граничном слое всплывающего пузырька увеличивается на  $11\text{--}14^\circ\text{C}$ , что приводит к снижению толщины смачивающей пленки, отвечающей смене знака структурной составляющей расклинивающего давления. **Практическая значимость.** На пробе упорной золотосодержащей руды проведена экспериментальная апробация разработанной технологии и показано, что при ее применении содержание золота в концентрате флотации увеличивается в 1,8 раза при уменьшении выхода флотоконцентрата на 39,5% отн. и извлечение золота от операции повышается с 76,8 до 89,9%.

**Ключевые слова:** упорная золотосодержащая руда, флотация, заполнение пузырьков паром, экспериментальные исследования.

© Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., 2021

### Для цитирования

Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е. Схема и режим флотации для извлечения золота из упорных руд // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 24–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-24-36>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# FLOTATION FLOWSHEET AND MODE FOR RECOVERY OF GOLD FROM REFRACTORY ORES

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E.

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

**Abstract. Problem Statement.** When enriching refractory gold-bearing ores, a decrease in the yield of the concentrate sent to the gold extraction and subsequent cyanidation significantly reduces capital expenses and operating costs, providing a solution to the urgent problem of increasing the production efficiency of commercial products. **Objectives.** To increase the technical and economic indicators of ore processing by reducing the yield of the concentrate sent to the biooxidation of sulfides by aerating the pulp with a mixture of air and hot water steam, namely flotation with steam-air bubbles. **Originality.** Based on the data on the dependence of the forces of hydrophilic repulsion and hydrophobic attraction caused by the difference in the structure of water in the boundary layers of minerals from the structure of water in the bulk, it was concluded that it was possible to change the results of flotation by increasing the temperature of the wetting film, for example, by using steam condensation heat. For this purpose, the pulp is aerated with a mixture of air and hot steam. An increase in the temperature of the wetting film is the cause of an increase in the hydrophilic repulsion forces that stabilize the film, and the loss of stability of the wetting film is associated with an increase in the forces of hydrophobic attraction. **Findings.** Using the developed stand and the technique, the heat transfer coefficient was measured at different vapor concentrations in the air bubble and it was revealed that when the mass fraction of steam in the steam-air mixture was more than  $0.30 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  due to the heat of its condensation, water temperature in the boundary layer of the floating bubble increased by  $11\text{--}14^\circ\text{C}$ , leading to a decrease in thickness of the wetting film, corresponding to a change in the sign of the structural component of wedging pressure. **Practical Relevance.** An experimental testing of the developed technology was carried out on a sample of refractory gold-bearing ore and it was shown that when it was applied, the gold content in the flotation concentrate increased by 1.8 times with a decrease in the yield of the flotation concentrate by 39.5% rel. and gold recovery from the operation increased from 76.8% to 89.9%.

**Keywords:** refractory gold-bearing ore, flotation, steam bubble filling, experimental studies.

## For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E. Flotation Flowsheet and Mode for Recovery of Gold from Refractory Ores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 24–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-24-36>

## Введение

Наличие значительной сырьевой базы [1, 2] и устойчивое увеличение добычи золота из недр [3] позволило России войти в тройку крупнейших стран-производителей драгоценного металла [4]. Нарастание в стране производства золота происходит в основном за счет интенсивного освоения месторождений с упорными, трудно-обогатимыми рудами Дальнего Востока и Сибири. Увеличению добычи золота из руд собственно золоторудных месторождений способствует рост цены на металл: цена тройской унции золота превысила отметку в 2000 долл. США, что способствует увеличению добычи золота из руд собственно золоторудных месторождений. Рост цен на золото оказывает позитивное влияние на финансовое положение золотодобывающих компаний [5]: в течение последних 10 лет объем сделок M&A с золотодобывающими активами достиг максимального уровня и в стоимостном выражении составил более 18 млрд долл. США.

Однако в настоящее время золотодобывающие компании все больше вовлекают в промышленное освоение месторождения руд, золото в

которых относится к категории трудноизвлекаемого – так называемого «упорного» к извлечению цианированием [6]. Упорность золота в рудах связана с его тонкой вкрапленностью в сульфидных минералах, прежде всего в арсенопирите и пирите, а также породообразующих минералах, что является причиной потерь золота при цианировании, низких технико-экономических показателей переработки сырья.

Для обеспечения доступа выщелачивающего раствора цианида к золоту, содержащемуся в концентратах, выделенных из упорных руд методом флотации, их подвергают окислительному обжигу, автоклавному или биологическому окислению. Эти процессы длительные и дорогостоящие, требуют больших производственных площадей. Так, при наиболее перспективном процессе вскрытия сульфидов – автоклавным окислением – затраты на электроэнергию составляют более 1000 руб./т концентрата, а на реагенты ~5000 руб./т. В зависимости от химического и вещественного состава концентрата длительность процесса биоокисления по традиционной технологии составляет 4–6 суток и более.

Целью работы является повышение технико-экономических показателей переработки руд за счет уменьшения выхода концентрата, направляемого на биоокисление сульфидов, путем применения аэрации пульпы смесью воздуха с горячим водяным паром – флотации паровоздушными пузырьками.

### Объект и методы исследования

В лабораторных условиях исследовательские испытания режима флотации паровоздушной смесью проведены на пробе руды Олимпиадинского месторождения.

Химический состав пробы руды позволяет отнести ее к сульфидным (первичным) рудам (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав исходной пробы руды  
Table 1. Chemical composition of an original ore sample

Наименование элемента и соединения	Содержание, %	Наименование элемента и соединения	Содержание, %
Cu	0,006	Fe	2,35
Pb	0,006	S	1,52
Zn	0,019	SiO <sub>2</sub>	48,70
As	0,36	Au	2,95±0,14 г/т
Sb	0,03	Ag	2,4 г/т

Сульфидные минералы в пробе исходной руды представлены (в порядке убывания) пирротин, пиритом, арсенопиритом, халькопиритом, сфалеритом и антимонитом. Породообразующими минералами пробы исходной руды являются кварц, карбонаты и слюды.

Из результатов рационального анализа на формы золота, приведенного в табл. 2, следует, что в тонкоизмельченной руде из всего золота на свободное золото приходится 15,0% и больше половины находится в сростках и связано с сульфидами.

Оптические исследования выполнены с применением поляризационного микроскопа Leica DM 2700P, для изучения минералогического состава использован оптический стереомикроскоп Olympus модели SZ51, электронно-зондовый микроанализатор EPMA-1720/1720H использован для рентгеноспектрального микроанализа минералов. Содержание золота определяли пробирным концентрированием благородных ме-

таллов в свинцовый сплав и пробирно-атомно-абсорбционным методом.

Для измерения коэффициента теплоотдачи при барботировании воды паром разработан стенд (рис. 1) с ячейкой-калориметром 4 в виде рабочей зоны флотационной машины механического типа.

Парогенератор установки выполнен в виде котла 1 с рабочим объемом 12,0 дм<sup>3</sup> с двумя U-образными электронагревателями (ТЭНами) мощностью по 315 кВт. Давление пара в котле плавно регулируется изменением мощности ТЭНов релейным способом. Электрические контакты на ТЭНах замыкаются при заполнении котла до датчика верхнего уровня воды.

Котел соединен со шлюзовой камерой ячейки-конденсатора (калориметром) паровой магистрали с пароперегревателем из нихромовой проволоки. Теплопроводом служит гибкий сильфонный шланг, экранированный от теплопотерь шнуром из асбеста. В шлюзовую камеру входит пневмопровод, сообщающийся с атмосферой через ротаметры и регулирующие вентили расхода воздуха. Шлюзовая камера предназначена для смешения пара и воздуха в заданном соотношении.

Калориметр изготовлен из стали марки 12Х18Н10Т в виде цилиндра с площадью основания 0,011 м<sup>2</sup> и высотой 0,3 м.

Через герметичную верхнюю крышку калориметра в ячейку-конденсатор с сальниковыми уплотнениями из фторопласта помещен блок импеллера лабораторной флотационной машины механического типа с регулируемым числом оборотов привода 4. Вход аэрационной трубы блока импеллера сообщен со шлюзовой камерой, а выход – с узким зазором между статором и импеллером. Импеллер выполнен в виде диска Ø 0,068 м со ступицей с 4-мя радиальными лопатками. В зазоре из-за вращения импеллера давление понижено и сюда из шлюзовой камеры поступает паровоздушная смесь. При максимальном числе оборотов импеллера в рабочую зону поступает до 4,1 м<sup>3</sup>/(мин·м<sup>2</sup>) воздуха.

Ячейка проточная: в рабочую зону из напорного бака при постоянном давлении может поступать и удаляться в дренаж до 1,2 м<sup>3</sup>/(мин·м<sup>2</sup>) воды. При минимальных расходах воды время пребывания (задержки) потока в рабочей зоне ячейки составляет до 100 с.

Таблица 2. Результаты рационального анализа форм золота в пробе исходной руды  
Table 2. Rational analysis of ore forms in the original ore sample

Наименование продукта	Содержание золота, г/т (%)					Общее содержание золота
	Золото свободное	Золото в сростках	Золото в «рубашке»	Золото в кварце	Золото в сульфидах	
Проба исходной руды, измельченная до крупности 85% кл. -71 мкм	0,45(15,0)	0,98(32,7)	0,37(12,4)	0,34(11,2)	0,86(28,7)	3,0(100,0)

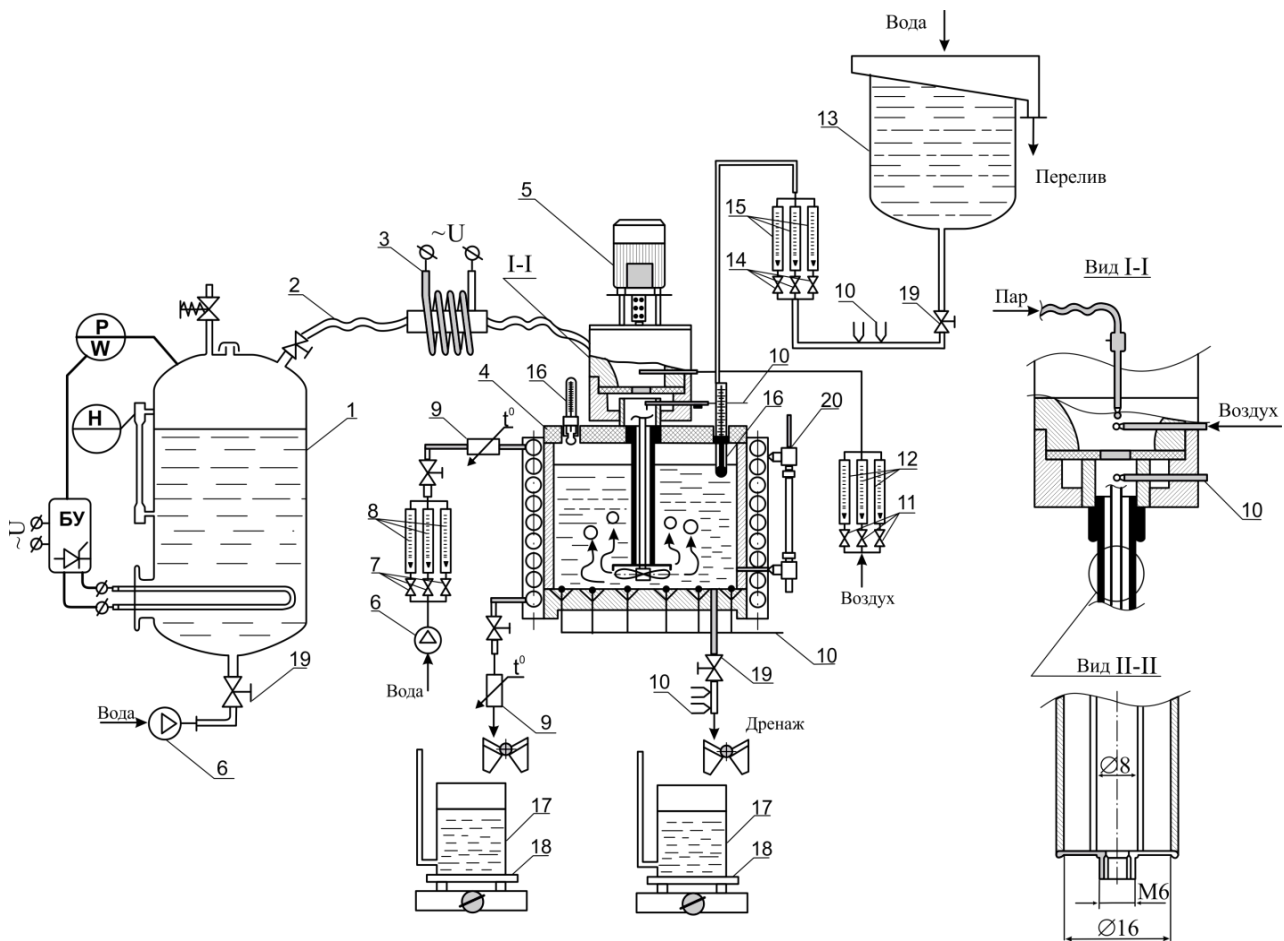


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – котел парогенератора; 2 – паропровод с электрическим пароперегревателем 3; 4 – ячейка-калориметр с приводом блока импеллера 5; 6–9 – гидросистема с водяным насосом 6, регулирующими вентилями расхода воды 7, ротаметрами 8, термопарой 9; 10 – термометр сопротивления; 11, 12 – пневмосистема с регулируемыми вентилями расхода воздуха 11 и ротаметрами 12; 13–15 – контур подачи воды из бака постоянного напора 13 с регулируемыми вентилями расхода воды 14, ротаметрами 15; 16 – система термометрии; 17 – мерная емкость; 18 – весы; 19 – вентиль; 20 – уровнемер; вид I-I – фрагмент разреза входа аэрационной трубы с камерой смешения воздуха с паром, вид II-II – фрагмент разреза насадки

Fig. 1. Diagram of the experimental stand: 1 is a boiler of a steam generator; 2 is a steam pipeline with electrical superheater 3; 4 is a cell-calorimeter with a drive of impeller unit 5; 6–9 is a hydraulic system with water pump 6, water flow control valves 7, rotameters 8; thermocouple 9; 10 is a resistance thermometer; 11, 12 is a pneumatic system with air flow control valves 11 and rotameters 12; 13–15 is a water supply circuit from constant-head tank 13 with water flow control valves 14, rotameters 15; 16 is a temperature measurement system; 17 is a measuring container; 18 is a scale; 19 is a valve; 20 is a level gauge; view I-I is a part of the section of the entry of the aeration tube and a chamber of mixing air and steam, view II-II is a part of the section of a jet

На аэрационную трубу блока импеллера может накручиваться насадка в виде коаксиально установленных трубок из стали марки 12Х18Н10Т с внутренними диаметрами 16 и 8 мм (см. **рис. 1, вид I-I**). Насадка заканчивается резьбовым сходом М6×0,75 для установки сопел разного диаметра. Воздушный зазор между трубками в насадке предотвращает конденсацию пара перед соплом.

Экспериментальная ячейка помещена в кольцевой трубопровод с системой подвода

6–9 и отвода 9, 17, 18 воды, по температуре которой определяют момент наступления стационарного режима работы стенда и тепловой поток на стенку ячейки.

Для измерения температуры холодного и горячего теплоносителя в состав установки входит система термометрии на основе хромель-копелевых термопар (ТХК) и ртутных погружных термометров типа СП-73 с диапазоном измерения температуры +8...+38°C и с ценой деле-



ния 0,2°C; регистрацию напряжения на термопарах осуществляют цифровым вольтметром типа Щ 1516 и потенциометрами ЭПД-07 и ПП-63 с классом точности 0,05.

Температуру паровоздушной смеси на входе в аэрационную трубу определяли в шлюзовой камере с помощью запаянной в стальную гильзу термопары. Для измерения температуры потока воды на выходе (дренажа) из калориметра в 6 сечениях через колодцы с наружным Ø 0,9 мм из нержавеющей стали в дно ячейки вмонтированы горячие спаи кабельных хромель-копелевых термопар Ø 0,2 мм. Их холодные спаи термостатировали при температуре таяния льда из дистиллированной воды в сосуде Дьюара.

Для измерения температуры потока воды на входе и выходе змеевика гидросистемы использовали термометры сопротивления КТСН-Н.

Бездемонтажную калибровку термопар и термометров сопротивления осуществляли с помощью эталонного платинового термометра сопротивления ТСП-ОМ. Расход пара определяли весовым методом – взвешиванием мерной емкости объемом 0,5 дм<sup>3</sup> на технических весах модели Меттлер Толодо с грузоподъемной чашкой SmartPan и линейки ВЛЭ-С с дискретностью показаний 0,01 г. Температуру насыщенного пара контролировали по величине его давления с использованием манометра типа ЭДМ с диапазоном измерений 0–1 МПа. Относительную влажность воздуха определяли с использованием цифрового гигрометра типа «Волна-5П» с погрешностью ±2,5%.

Условия определения величины коэффициента теплоотдачи соответствовали режиму флотации во флотомашине колонного типа: центробежный критерий Рейнольдса  $Re = (74–148) \cdot 10^6$ ; температура холодного теплоносителя – воды – 18–20°C; расход воды – от 0,3 до 1,2 м<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>2</sup> сечения ячейки-калориметра; расход воздуха – от 0,8 до 4,1 м<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>2</sup> сечения ячейки-калориметра; расход пара – от 0,21 до 1,05 кг/т воды через 1 м<sup>2</sup> сечения ячейки-калориметра; температура пара 104°C при давлении  $0,10 \pm 0,010$  МПа и плотности 0,625 кг·м<sup>-3</sup>.

Полученные экспериментальные результаты обрабатывали по методике, изложенной в работе [7].

За счет теплоты конденсации пара  $Q_k$ , кВт, температура потока воды  $G_B$ , кг·с<sup>-1</sup>, в ячейке-калориметре увеличивается от  $T_{K1}$  на входе до  $T_{K2}$  на выходе. При низкой температуре эксперимента потери в окружающую среду от излучения теплоты корпусом калориметра незначительны. Поэтому плотность теплового потока

$$Q_k = G_B \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где  $c_p$  – изобарная теплоемкость воды, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\Delta T = (T_{K2} - T_{K1})$ , К.

Тепло от смешения воды с конденсатом пара составляет <1% и для практических расчетов пренебрежимо мало. Тогда, согласно закону Ньютона-Рихмана, при температуре насыщения паровоздушной смеси  $T_s$  и выходе температуры потока воды на стационарный режим при температуре стенки  $T_c$  значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , кВт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>, определяется по формуле

$$\alpha = \frac{Q_k}{F(T_s - T_c)}, \quad (2)$$

где  $F$  – площадь поверхности, воспринимающей теплоту  $Q_k$ , м<sup>2</sup>.

При статистической обработке группы результатов измерений доверительные границы измеряемой величины  $\Delta x$  рассчитывали в виде произведения табличного значения критерия Стьюдента  $t_T$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$  и среднего квадратического отклонения среднего арифметического  $S_{\bar{x}}$ :

$$\Delta x = t_T \cdot S_{\bar{x}}. \quad (3)$$

### Постановка и метод решения задачи

В работе решается задача повышения эффективности переработки минерального сырья методом флотации путем модификации технологических свойств пузырьков воздуха тепловым воздействием.

Тонкие слои воды под влиянием молекулярного действия твердого тела приобретают состояние и свойства, отличные от объемных [8]. Силы, действующие в этих граничных слоях, относятся к поверхностным силам [9]. Поверхность твердого тела действует на более удаленные слои не на расстоянии, а путем передачи структурной информации от слоя к слою на расстояние до десятых долей микрона [10], в том числе вблизи поверхности золота [11].

В зависимости от знака изменения свободной энергии при утончении смачивающей пленки до толщины граничного слоя с измененной структурой между телами возникают силы притяжения или силы отталкивания [12]. Первый случай называют гидрофобным взаимодействием [13, 14]. Поэтому для второго случая естественно предположить название гидрофильного взаимодействия. Последнее способно обеспечить длительную устойчивость гидрофильных частиц.



Структура воды с повышением температуры изменяется (уменьшается мольная доля соединенных водородными связями молекул по Nemethy и Scheraga [15, 16], заполняются пустоты тетраэдрического каркаса несвязанными молекулами воды по Самойлову, Danford и Levy [15, 16], водородная связь искажается у большей доли молекул по Pople [15, 16]), но в объеме больше, чем в защищенных поверхностью от теплового действия граничных слоев. В результате свободная энергия структуры граничного слоя уменьшается медленнее, чем в объеме, что является причиной роста величины сил гидрофобного притяжения и гидрофильного отталкивания при повышении температуры. Таким образом, для повышения эффективности разделения минералов методом флотации достаточно повысить температуру в разделяющем частицу и пузырек слое жидкости (толщиной порядка 10–20 нм), в пределах которого локализовано действие поверхностных сил, а не всего объема пульпы. Сопряженные процессы нагрева межфазного слоя жидкости и контакта частицы с пузырьком должны протекать в одном интервале времени (соизмеримом со временем индукции [17–19]).

Силы гидрофильного отталкивания могут быть сведены к избыточному осмотическому давлению между гидрофильными поверхностями [20], а избыточное осмотическое давление окружающей воды (пониженное осмотическое давление (декомпрессия [21]) между поверхностями) – к силам гидрофобного притяжения.

Поставленная задача решается путем применения для аэрации пульпы при флотации смеси воздуха с горячим водяным паром. При внезапном контакте пузырька пара с холодной пульпой пар конденсируется и тепловой поток отводится из пузырька в граничный слой жидкости, а при контакте пузырька пара с твердой частицей – в смачивающую пленку.

При коэффициенте температуропроводности пара  $a = 18,58 \text{ м}^2/\text{с}$  время выравнивания температуры пара в пузырьках размером  $R = (1,0 - 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  с площадью поверхности  $F = (12,56 - 18,84) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  в неравновесном тепловом процессе их взаимодействия с холодной водой составляет 0,7–1,0 с.

Однако добавка к пару неконденсирующегося газа – воздуха – приводит к значительному снижению скорости теплообмена и конденсационной мощности [22].

Увеличение в присутствии неконденсирующегося воздуха времени перехода пара от метастабильного состояния к состоянию, близкому к равновесному, позволяет предположить, что передача теплоты от пара в пузырьке к воде и взаимодействие пузырька с частицей при флотации происходят в одном интервале времени.

### Характеристика предмета исследования

Экспериментально установлено, что при увеличении концентрации пара в паровоздушной смеси до  $\sim 0,30 \text{ кг/кг}$  значение коэффициента теплоотдачи практически не изменяется, оставаясь на уровне  $0,004\text{--}0,005 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  (рис. 2).

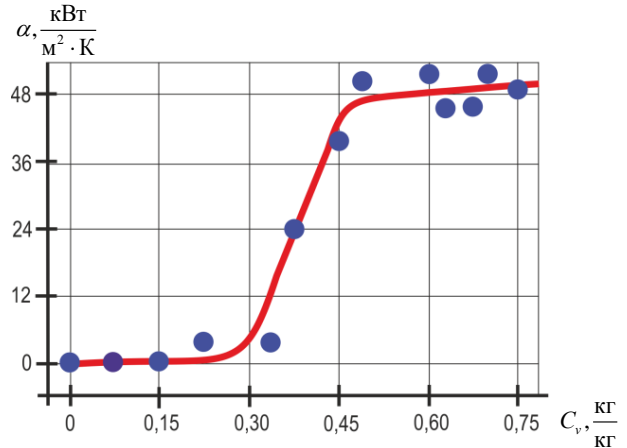


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  как функция концентрации пара  $C_v$

Fig. 2. Heat transfer coefficient  $\alpha$  as a function of steam concentration  $C_v$

При дальнейшем увеличении концентрации пара в паровоздушной смеси в достаточно узком интервале концентраций (0,30–0,45 кг/кг) следует резкое увеличение величины коэффициента теплоотдачи до его максимального значения ( $\sim 48 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ).

Внезапный контакт пузырька пара с холодной водой можно представить так, как если бы непроницаемая теплоизолирующая перегородка между водой и ее горячим паром была мгновенно удалена (рис. 3). В течение нескольких миллисекунд между температурой воды в граничном слое и пара устанавливается разность в  $2\text{--}3^\circ\text{C}$  [23–26].

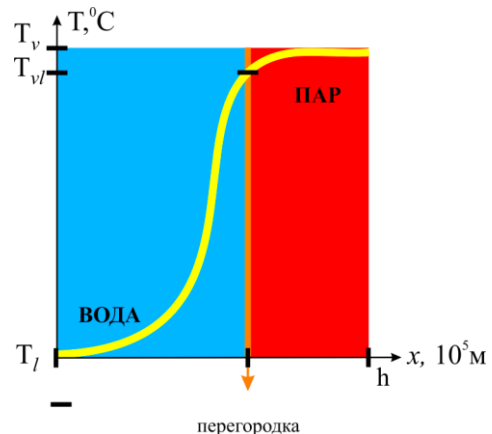


Рис. 3. Схема изменения температуры воды в граничном слое

Fig. 3. Water temperature changes in a boundary layer

В присутствии тяжелого неконденсирующегося газа (воздуха, азота) мощность теплоотвода к охлаждающему теплоносителю снижается [22] в результате ухудшения условий для конденсации.

В паровоздушном пузырьке (рис. 4) при совместном тепломассообмене плотность теплового потока  $j = j^+ - j^-$  складывается из теплового потока к межфазной поверхности  $j^-$ , кВт·м<sup>-2</sup>, и встречного потока молекул испаряющегося вещества несущей жидкой фазы  $j^+$ , кВт·м<sup>-2</sup>.

При небольших концентрациях пара в паровоздушной смеси передача теплоты от конденсирующегося пара к межфазной поверхности затруднена термическим сопротивлением, оказываемым наличием вблизи нее слоя неконденсирующегося воздуха: высокая частота и вероятность столкновения воздуха с паром сводит к минимуму интенсивность тепломассообмена. Пар концентрируется в центре пузырька и преодоление слоя неконденсирующегося воздуха возможно только за счет диффузии (рис. 4, а). С увеличением массовой доли пара в паровоздушной смеси (более 0,30 кг·кг<sup>-1</sup>) слой неконденсирующегося воздуха утончается и становится разреженным, и тепловой поток на границе раздела фаз газ-жидкость резко увеличивается (рис. 4, б).

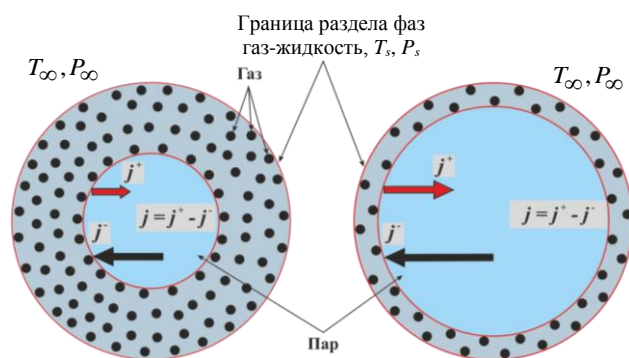


Рис. 4. Схема тепловых потоков  $\longrightarrow (j^-)$  и  $\longrightarrow (j^+)$  в присутствии неконденсирующихся газов (воздуха)

Fig. 4. Diagram of heat flows  $\longrightarrow (j^-)$  and  $\longrightarrow (j^+)$  in presence of noncondensable gases (air)

При переходе от неподвижной границы тепломассообмена (см. рис. 3) к подвижной на межфазной поверхности устанавливается температура  $T_{gl}$ , выражение для которой получено решением уравнения теплопроводности [26] в виде

$$T_{gl}(x, t) = T_0 + \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^t q(t-\tau) \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}, \quad (4)$$

где  $x$  – координата, м;  $q(\tau)$  – плотность теплового потока со стороны газовой фазы, рассчитываемая по закону Фурье, Вт·м<sup>-2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент тепло-

проводности, Вт·м<sup>-1</sup>·град<sup>-1</sup>;  $a$  – коэффициент температуропроводности пара, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $t$  – время движения пузырька, с;  $\tau$  – время наступления регулярного теплового режима, с [27, 28].

По нашим оценкам, при подъеме пузырька размером  $R = 1 \cdot 10^{-3}$  м на  $H = 1$  м со скоростью  $v = 0,136$  м/с разница  $\Delta T$  между температурой воды на поверхности пузырька  $T_{gl}$  и в объеме жидкости  $T_\infty$  составляет  $\Delta T = T_{gl} - T_\infty = 11-14^\circ\text{C}$ ; толщина температурного слоя  $h_{gl}$  пузырька пара составляет  $h_{gl} = D / 2\sqrt{\text{Re}} = 0,1$  мм (при числе Рейнольдса  $\text{Re} = 100$ ).

### Результаты исследования и их анализ

При флотации пробы золотосодержащих руд апробирован режим флотации с подачей в аэрактор флотомашины колонного типа пара, исходя из 0,34 кг·т<sup>-1</sup> исходной пульпы.

С применением схемы и реагентного режима, рекомендуемого для обогащения руд [29], из пробы руды в концентрат, содержащей 86,78 г/т золота при выходе 2,98%, извлечено 85,07% металла.

Повышение достигнутых технологических показателей обогащения руд возможно путем оптимизации условий разделения в операциях основной флотации и перераспределения концентрата.

В существующих схемах флотации в операцию основной флотации направляют хвосты I перераспределения и концентрат контрольной флотации, что объясняется примерно одинаковым содержанием в них извлекаемого компонента. Однако извлекаемые минералы в исходном сырье и промежуточных продуктах различаются по флотиремости: скорость флотации медленно флотируемой фракции ценного компонента и быстро флотируемой фракции подавляемого минерала выравниваются и фракции примерно с одинаковой интенсивностью переходят в концентрат. Появление при смешении распределения извлекаемых минералов по флотиремости (понижение контрастности) приводит к увеличению их потерь с хвостами флотации.

В работе для повышения контрастности материала по флотиремости в операции основной флотации в нее направляют концентрат, для выделения которого из материала промпродуктов схему флотации дополняют операцией промпродуктовой флотации.

Следствием извлечения ценных минералов в концентрат с различной интенсивностью (при смешении флотоактивных минералов в питании с трудно извлекаемыми (упорными) формами минералов в промпродуктах) является появление

их распределения по времени пребывания во флотомашине. Отсутствие распределения извлекаемых минералов по времени пребывания во флотомашине и близость результата разделения к результату периодического процесса (с высоким извлечением и качеством концентрата) является отличием аппарата с идеальным вытеснением от аппарата с идеальным перемешиванием. Минимальная скорость радиального перемешивания во флотомашине колонного типа позволяет рассматривать ее как аппарат с идеальным вытеснением с характерными для него преимуществами.

С целью повышения достигнутых технологических показателей перемешивания концентрата основной флотации выполняли в колонной флотационной машине с аэратором конфузор-диффузорного типа для подачи смеси воздуха с водяным паром (рис. 5).

Измельчение руд осуществляли в две стадии (до 40,3% кл. -74 мкм в первой и до 85,7% кл. -74 мкм во второй) в стержневой мельнице размером  $D \times L = 163 \times 220$  мм при отношении  $T:Ж = 1:1$  и загрузке в нее 9 кг стержней  $\varnothing 15-30$  мм. Из продуктов измельчения на концентрационных столах (типа 30А-КЦМ в операции основной концентрации и СКЛ2 в операции перемешивания концентрата) выделен гравито-концентрат с содержанием золота 73,19 г/т Au при извлечении 20,08%.

Флотацию хвостов гравитации осуществляли во флотомашине механического типа с объемом камеры 3 дм<sup>3</sup> при числе оборотов импеллера 1863 об/мин (вогнутый диск  $\varnothing 68$  мм с четырьмя радиальными лопатками и ступицей) и расходе воздуха 1,14 м<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>3</sup> объема камеры. Золото извлекали бутиловым ксантогенатом калия и Т-80 в щелочной среде (загрузка соды до pH 8,5–8,7) после активации сульфидов медным купоросом. Получен черновой концентрат с содержанием 26,73 г/т Au при извлечении 68,69%.

Черновой концентрат перемешивали во флотационной колонне  $\varnothing 6,4$  см с высотой зоны минерализации 2,1 м и высотой зоны очистки – 0,60 м при противоточном движении исходного питания и газовой фазы. В пневмогидравлическом аэраторе рабочий газовый поток через конфузор  $\varnothing 1$  мм поступает в коническую камеру смешения (с горловиной) с расширяющимся диффузором  $\varnothing 5,1$  мм на выходе общей длиной 15,2 см. В камеру смешения через патрубок  $\varnothing 1,47$  мм подается раствор ксантогената под давлением 12,7 кПа. Аэратор вынесенный, боковой, донный.

Производительность колонны по пульпе при перемешивании чернового концентрата составляла 31,5 кг·с<sup>-1</sup> на 1 м<sup>2</sup> сечения колонны. На аэрацию подавали 26,1·10<sup>-3</sup> кг·с<sup>-1</sup> воздуха из расчета на 1 м<sup>2</sup> сечения колонны и 10,7·10<sup>-3</sup> кг·с<sup>-1</sup> пара с темпера-

турой 104°C и давлением 218 кПа (0,34 кг·т<sup>-1</sup> исходной пульпы). Из водного баланса колонны следует, что при расходе промывной воды 0,34 м<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>2</sup> сечения колонны поток воды в хвосты превышал поток воды в питание на 7–8%, что позволяло подавлять механический вынос нефлотируемых минералов в концентрат.

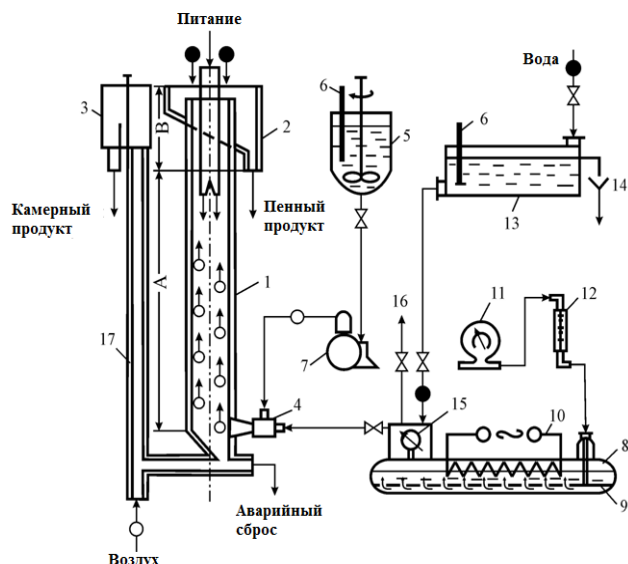


Рис. 5. Схема цепи аппаратов лабораторного стенда для флотации паровоздушной смесью: 1 – флотационная колонна; 2, 3 – приемники продуктов разделения; 4 – пневмогидравлический аэратор конфузор-диффузорного типа; 5–7 – линия инъекции раствора пенообразователя; 8–10 – парогенератор (8) с системой барботажного воздуха (9) и электронагрева воды (10); 11, 12 – линия подачи и контроля расхода воздуха; 13, 14 – линия подачи воды с постоянным напором; 15, 16 – линия контроля расхода (15) и сброса избытка (16) паровоздушной смеси

Fig. 5. Diagram of devices of the laboratory stand for the flotation with a steam-air mixture: 1 is a flotation column; 2, 3 are receiving containers of products of separation; 4 is a pneumohydraulic aerator of a confuser-diffuser type; 5–7 is a foam solution injection line; 8–10 is a steam generator (8) with an air bubbling system (9) and an electrical water heating system (10); 11, 12 is an air supply and consumption control line; 13, 14 is a constant head water supply line; 15, 16 is a steam-air mixture consumption control line (15) and an excess mixture relive line (16)

На перемешивание подавали бутиловый ксантогенат калия из расчета 25 мг/дм<sup>3</sup>. Давление воздуха на входе в эрлифт 0,14 МПа при расходе 0,045 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> удаляемой в хвосты пульпы. Удельный расход электроэнергии 0,34 кВт/м<sup>3</sup> пульпы.

На рис. 6 приведена рекомендуемая качественно-количественная схема флотации руд, полученная по результатам флотации в условиях, моделирующих замкнутый цикл. Опыт со-

стоял из 6 заворотов промежуточных продуктов, при которых была достигнута стабилизация содержания золота в отвальных хвостах.

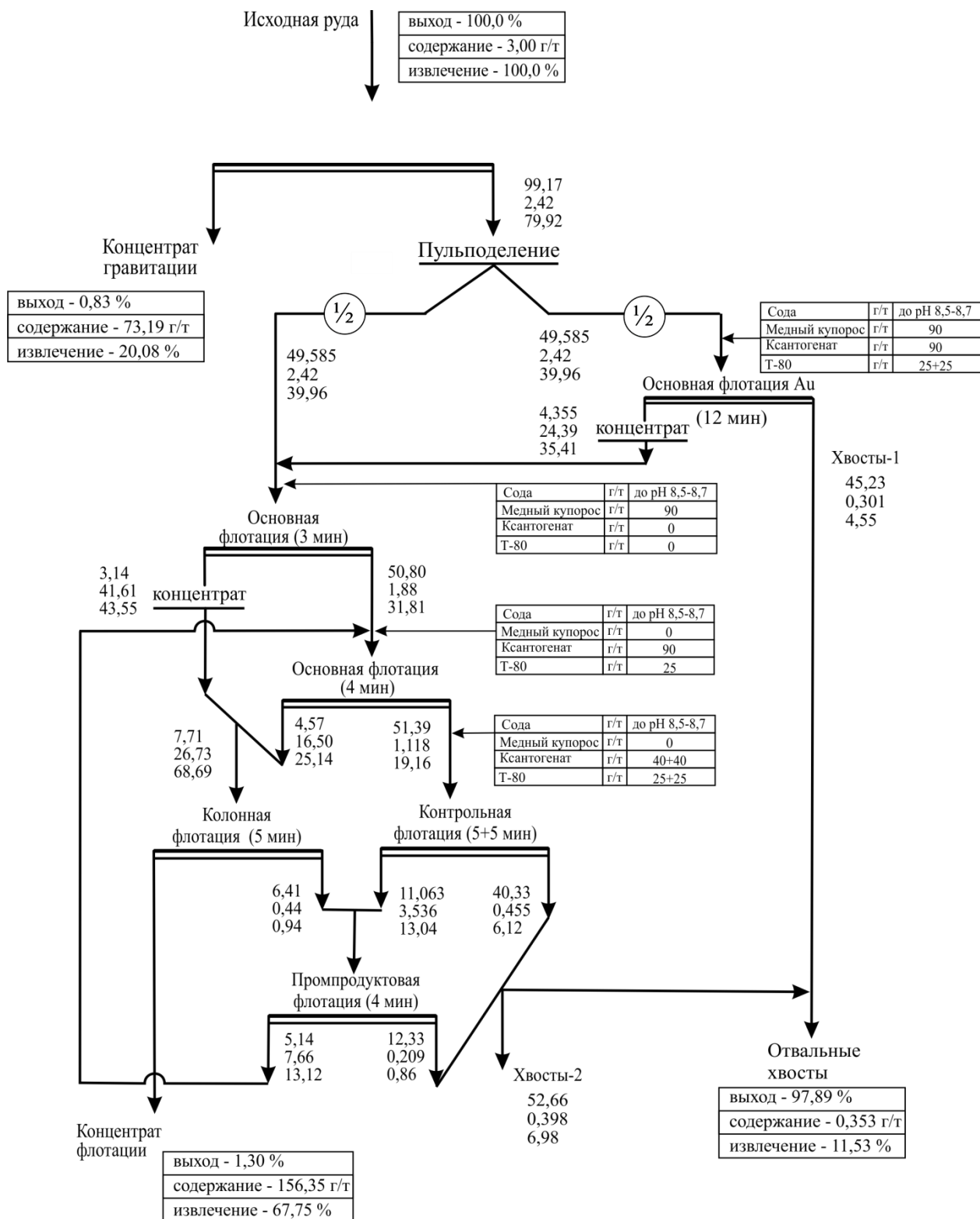


Рис. 6. Качественно-количественная схема флотации руд  
Fig. 6. Production and weighted flowsheet of ore flotation



Сравнение достигнутых показателей обогащения руд (см. **рис. 6**) с ранее полученными [29, 30] позволяет сделать следующие выводы.

В концентрат извлечено 88,47% золота (в том числе 20,72% – в концентрат гравитации); при выходе концентрата 2,11% в нем содержится 125,79 г/т золота.

Применение одной перемешки черного концентрата в колонной флотомашине вместо двух перемешек во флотомашине механического типа позволило увеличить извлечение золота от операции с 76,8 до 89,9%; содержание золота в концентрате флотации увеличилось в 1,8 раза при уменьшении выхода флотоконцентрата на

$$\left(100 - \frac{1,30}{2,15} \cdot 100\right) = 39,5 \% \text{ отн.}$$

Введение операции флотации промпродуктов – хвостов I перемешки и концентрата контрольной флотации – позволило уменьшить разубоживание питания основной флотации путем уменьшения на >38% отн. выхода промпродуктов, возвращаемых в операцию основной флотации. В результате извлечение золота во флотоконцентрат увеличилось на 2,76% (с 64,99 до 67,75%) за счет уменьшения потерь золота с отвальными хвостами на

$$\left(100 - \frac{11,53}{14,93} \cdot 100\right) = 22,8 \% \text{ отн.}$$

### Заключение

При гидрофобизации поверхности структурное притяжение увеличивается, а силы структурного отталкивания ослабевают, что является причиной снижения равновесной толщины смачивающей пленки, потери ее устойчивости. Кроме гидрофобизации поверхности перевод смачивающих пленок в метастабильное состояние возможен за счет нагрева воды в тонком зазоре между частицей и пузырьком, например путем использования теплоты конденсации водяного пара. С этой целью аэрацию пульпы осуществляют смесью воздуха с горячим водяным паром. Повышение температуры смачивающей пленки является причиной роста сил гидрофильного отталкивания, стабилизирующих пленку, а потеря устойчивости смачивающей пленки связана с ростом сил гидрофобного притяжения. Силы гидрофильного отталкивания могут быть сведены к избыточному осмотическому давлению между гидрофильными поверхностями, а избыточное осмотическое давление окружающей воды (пониженное осмотическое давление (декомпрессия) между поверхностями) – к силам гидрофобного притяжения.

С использованием разработанного стенда и методики проведены измерения коэффициента теплоотдачи при различной концентрации пара в пузырьке воздуха. Установлено, что при массовой доле пара в паровоздушной смеси более 0,30 кг·кг<sup>-1</sup> тепловой поток на границе раздела фаз газ-жидкость резко увеличивается. На неподвижной границе раздела фаз газ-жидкость в течение нескольких миллисекунд между температурой воды в граничном слое и пара устанавливается разность в 2–3°C; в граничном слое всплывающего пузырька температура воды на 11–14°C выше, чем в объеме воды.

Разработанный режим аэрации пульпы апробирован в лабораторных условиях в операции перемешки черного концентрата при флотации золотосодержащих руд. Сравнение достигнутых показателей с ранее достигнутыми позволяет рекомендовать способ флотации паровоздушной смесью для применения в практике обогащения золотосодержащих руд с целью повышения технологических показателей их обогащения.

### Список литературы

1. Минерально-сырьевая база золота России: состояние и перспективы развития / Михайлов Б.К., Иванов А.И., Вартанян С.С., Беневольский Б.И. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2014. № 6. С. 9–13.
2. Панов Р.С. О результатах и проблемах развития минерально-сырьевой базы России по итогам работ АО «Росгеология» в 2018 г. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2019. №1. С. 4–5.
3. Алексеев Я.В., Корчагина Д.А. Сырьевая база рудного золота России: состояние освоения и перспективы развития до 2040 г. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. №4–5. С. 3–7.
4. Кашуба С.Г. Золотодобывающая отрасль России: состояние и перспективы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. №4–5. С. 48–52.
5. Заернюк В.М., Черникова Л.И., Забайкин Ю.В. Тенденции, проблемы и перспективы развития золотодобывающей отрасли России // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2017. Т. 10. №9. С. 972–986.
6. Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Троценко И.Г. Техничко-экономическое обоснование эффективности совместной переработки руд и россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №4. С. 12–23.
7. Шихалев С.В., Минухин Л.А., Решетников И.Ф. Процессы тепло- и массоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси на горизонтальной плоской поверхности аппаратов с рубашкой // Техника и

- технология пищевых производств. 2014. №3. С. 103–107.
8. Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces // *International Journal of Mineral processing*. 2016. Vol. 156. P. 62–68.
  9. Boinovich L., Emelyanenko A. Wetting and surface forces // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 165. No. 2. P. 60–69.
  10. Zheng J.-m., Chin W.-C., Khijniak E., Khijniak E., Pollack G.H. Surfaces and interfacial water: Evidence that hydrophilic surfaces have long-range impact // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 127. Issue 1. P. 19–27.
  11. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 361. Issue 1. P. 321–330.
  12. Liang Y., Hilal N., Langston P., Starov V. Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2007. Vol. 134-135. P. 151–156.
  13. Liu J., Cui X., Xie L., Huang J., Zeng H. Probing effects of molecular-level heterogeneity of surface hydrophobicity on hydrophobic interactions in air/water/solid systems // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019. Vol. 557. P. 438–449.
  14. Mishchuk N. The model of hydrophobic attraction in the framework of classical DLVO forces // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 168. Issues 1–2. P. 149–166.
  15. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 280 с.
  16. Евдокимов С.И., Панышин А.М., Солоденко А.А. Минералургия. В 2-х т. Т. 2. Успехи флотации. Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2010. 992 с.
  17. Verrelli D.I., Koh P.T.L., Bruckard W.J., Schwarz M.P. Variations in the induction period for particle–bubble attachment // *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 36–38. P. 219–230.
  18. Xia W. Role of surface roughness in the attachment time between air bubble and flat ultra-low-ash coal surface // *International Journal of Mineral Processing*. 2017. Vol. 168. P. 19–24.
  19. Albijanic B., Ozdemir O., Nguyen A.V., Bradshaw D. A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010. Vol. 159. P. 1–21.
  20. Ролдугин В.И. О едином механизме действия поверхностных сил различной природы // *Коллоидный журнал*. 2015. Т. 77. №2. С. 214–218.
  21. Ролдугин В.И., Харитонов Т.В. Осмотическое давление или декомпрессия? // *Коллоидный журнал*. 2015. Т. 77. №6. С. 783–791.
  22. Экспериментальные исследования условий конденсации пара в присутствии неконденсирующегося газа на вертикальном многорядном коридорном пучке слабонаклоненных змеевиковых труб / Тарасов Г.И., Синицын А.Н., Бабин В.А., Большухин М.А., Антипин С.Г., Белин А.В., Васяткин А.Г. // *Изв. вузов. Ядерная энергетика*. 2010. №4. С. 209–215.
  23. Лежнин С.И., Сорокин А.Л., Прибатурин Н.А. Эволюция давления и температуры при внезапном контакте холодной воды и насыщенного пара // *Труды Института механики УНЦ РАН*. 2007. С. 261–266.
  24. Лежнин С.И., Сорокин А.Л. Моделирование эволюции импульса разрежения при контакте холодной жидкости и насыщенного пара // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17. №3. С. 397–400.
  25. Эволюция межфазной поверхности тепломассообмена в барботируемом слое / Жуков В.П., Барочкин Е.В., Ненаездников А.Ю., Беляков А.Н., Росляков А.Н. // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2012. Вып. 4. С. 1–5.
  26. Крюков А.П., Ястребов А.К. Тепломассоперенос через пленку пара с учетом движения межфазной поверхности жидкость–пар и роста температуры границы раздела фаз // *Теплофизика высоких температур*. 2006. Т. 44. №4. С. 560–567.
  27. Логинов В.С., Озерова И.П. Оценка нестационарной теплоотдачи при пленочной конденсации пара на вертикальной стенке // *Известия Томского политехнического университета*. 2003. Т. 306. №6. С. 67–69.
  28. Петушков В.А., Мельситов А.Н. Двухфазное парожидкостное течение в переходных режимах // *Математическое моделирование*. 2003. Т. 15. №10. С. 109–128.
  29. Евдокимов С.И., Дадиев М.С., Подковыров И.Ю. Разработка новой схемы и способа флотации руд Олимпиадинского месторождения // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2014. №1. С. 3–11.
  30. Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е. Извлечение золота из руд флотацией в условиях тепломассообмена между фазами // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2017. Т. 15. №4. С. 10–18.

## References

1. Mikhailov B.K., Ivanov A.I., Vartanyan S.S., Benevolsky B.I. Mineral resource base of gold in Russia: state and development prospects. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2014, no. 6, pp. 9–13. (In Russ.)
2. Panov R.S. On the results and problems of the development of the mineral resource base of Russia based on the operating results of JSC Rosgeologia in 2018. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2019, no. 1, pp. 4–5. (In Russ.)
3. Alekseev Ya.V., Korchagina D.A. Raw material base of ore gold in Russia: the state of development and development prospects until 2040. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2020, no. 4-5, pp. 3–7. (In Russ.)

4. Kashuba S.G. Gold mining industry in Russia: state and prospects. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2020, no. 4-5, pp. 48–52. (In Russ.)
5. Zaernyuk V.M., Chernikova L.I., Zabaykin Yu.V. Trends, problems and prospects for the development of the gold mining industry in Russia. *Finansovaya analitika: problemy i resheniya* [Financial Analytics: Problems and Solutions], 2017, vol. 10, no. 9, pp. 972–986. (In Russ.)
6. Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Trotsenko I.G. Feasibility study of the joint processing of gold ores and placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 12–23. (In Russ.)
7. Shikhalev S.V., Minukhin L.A., Reshetnikov I.F. The processes of heat and mass transfer during condensation of steam from a steam-gas mixture on a horizontal flat surface of facilities with a jacket. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2014, no. 3, pp. 103–107. (In Russ.)
8. Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces. *International Journal of Mineral processing*, 2016, vol. 156, pp. 62–68.
9. Boinovich L., Emelyanenko A. Wetting and surface forces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 165, no. 2, pp. 60–69.
10. Zheng J.-M., Chin W.-C., Khijniak E., Khijniak E., Pollack G.H. Surfaces and interfacial water: Evidence that hydrophilic surfaces have long-range impact. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, vol. 127, issue 1, pp. 19–27.
11. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 361, issue 1, pp. 321–330.
12. Liang Y., Hilal N., Langston P., Starov V. Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 134-135, pp. 151–156.
13. Liu J., Cui X., Xie L., Huang J., Zeng H. Probing effects of molecular-level heterogeneity of surface hydrophobicity on hydrophobic interactions in air/water/solid systems. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, vol. 557, pp. 438–449.
14. Mishchuk N. The model of hydrophobic attraction in the framework of classical DLVO forces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 168, issues 1–2, pp. 149–166.
15. Eisenberg D., Kauzmann W. *Struktura i svoystva vody* [Structure and properties of water]. Leningrad: Gidrometizdat, 1975, 280 p. (In Russ.)
16. Evdokimov S.I., Panshin A.M., Solodenko A.A. *Mineralurgiya* [Mineralurgy], in 2 volumes, vol. 2, Achievements of Flotation. Vladikavkaz: OOO NPKP MAVR, 2010, 992 p. (In Russ.)
17. Verrelli D.I., Koh P.T.L., Bruckard W.J., Schwarz M.P. Variations in the induction period for particle–bubble attachment. *Minerals Engineering*, 2012, vol. 36–38, pp. 219–230.
18. Xia W. Role of surface roughness in the attachment time between air bubble and flat ultra-low-ash coal surface. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, vol. 168, pp. 19–24.
19. Albijanic B., Ozdemir O., Nguyen A.V., Bradshaw D. A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2010, vol. 159, pp. 1–21.
20. Roldugin V.I. On a single mechanism of action of surface forces of different nature. *Kolloidny zhurnal* [Colloid Journal], 2015, vol. 77, no. 2, pp. 214–218. (In Russ.)
21. Roldugin V.I., Kharitonova T.V. Osmotic pressure or decompression? *Kolloidny zhurnal* [Colloid Journal], 2015, vol. 77, no. 6, pp. 783–791. (In Russ.)
22. Tarasov G.I., Sinitsyn A.N., Babin V.A., Bolshukhin M.A., Antipin S.G., Belin A.V., Vasyatkin A.G. Experimental studies of the conditions of vapor condensation in the presence of non-condensable gas on a vertical multi-row in-line bundle of weakly inclined coil pipes. *Izv. vuzov. Yadernaya energetika* [News of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering], 2010, no. 4, pp. 209–215. (In Russ.)
23. Lezhnin S.I., Sorokin A.L., Pribaturin N.A. Evolution of pressure and temperature upon a sudden contact of cold water and saturated steam. *Trudy Instituta mekhaniki UNTS RAN* [Proceedings of the Institute of Mechanics of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2007, pp. 261–266. (In Russ.)
24. Lezhnin S.I., Sorokin A.L. Simulation of the evolution of the rarefaction pulse upon contact of cold liquid and saturated vapor. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics], 2010, vol. 17, no. 3, pp. 397–400. (In Russ.)
25. Zhukov V.P., Barochkin E.V., Nenaevnikov A.Yu., Belyakov A.N., Roslyakov A.N. Evolution of the interfacial surface of heat and mass transfer in the bubbling layer. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2012, issue 4, pp. 1–5. (In Russ.)
26. Kryukov A.P., Yastrebov A.K. Heat and mass transfer through a vapor film taking into account the motion of the liquid-vapor interface and an increase in the temperature of the phase interface. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Thermal Physics], 2006, vol. 44, no. 4, pp. 560–567. (In Russ.)
27. Loginov V.S., Ozerova I.P. Assessment of unsteady heat transfer in film condensation of steam on a vertical wall. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2003, vol. 306, no. 6, pp. 67–69. (In Russ.)

28. Petushkov V.A., Melsitov A.N. Two-phase vapor-liquid flow in transient modes. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling], 2003, vol. 15, no. 10, pp. 109–128. (In Russ.)
29. Evdokimov S.I., Datsiev M.S., Podkovyrov I.Yu. Development of a new scheme and method for flotation of ores of the Olimpiada deposit. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of Higher Educational Institutions. Non-Ferrous Metallurgy], 2014, no. 1, pp. 3–11. (In Russ.)
30. Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E. Extraction of gold from ores by flotation in the conditions of heat and mass transfer taking place between the phases. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 4, pp. 10–18. (In Russ.)

Поступила 02.06.2021; принята к публикации 30.06.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 02/06/2021; revised 30/06/2021; published 27/09/2021

**Евдокимов Сергей Иванович** – доцент, кандидат технических наук, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: eva-ser@mail.ru

**Герасименко Татьяна Евгеньевна** – кандидат технических наук, начальник отдела интеллектуальной собственности, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: gerasimenko\_74@mail.ru

**Sergey I. Evdokimov** – PhD (Eng.), Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: eva-ser@mail.ru

**Tatiana E. Gerasimenko** – PhD (Eng.), Head of the Intellectual Property Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: gerasimenko\_74@mail.ru



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-37-43



## УМЕНЬШЕНИЕ ПЫЛЕНИЯ ПРИ ДОБЫЧЕ И ПЕРЕВАЛКЕ УГЛЯ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВЫЕМОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Чебан А.Ю.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

**Аннотация. Актуальность и цель исследования.** Россия является одним из крупнейших производителей и экспортеров угля. На экспорт отправляется около половины добываемой продукции, при этом большая часть вывозимого из страны угля отгружается через морские порты. Вместе с увеличением объемов добычи и транспортировки угля растет отрицательная нагрузка на окружающую среду, важной экологической проблемой является загрязнение атмосферного воздуха угольной пылью, которая может находиться в воздухе долгое время и перемещаться на значительные расстояния. Угольная мелочь интенсивно выдувается при транспортировке и хранении угля, что приводит к потерям полезного ископаемого, а также загрязнению территорий, кроме того, наличие мелких фракций в угле снижает его качество и рыночную стоимость. **Цель работы.** Обоснование технико-технологического решения, обеспечивающего снижение пыления при добыче и перегрузках угля за счет удаления мелких фракций непосредственно во время выемочно-погрузочного процесса с применением модернизированного стрелового комбайна, а также сокращение количества специальных транспортных средств, осуществляющих аккумулялирование и перевозку просеянной угольной мелочи. **Результаты.** В статье предлагается конструкция модернизированного стрелового комбайна, обеспечивающего отделение угольной мелочи в процессе добычи, и технология его применения. Стреловой комбайн снабжен скребковым конвейером с классификационной решеткой и аспирационным устройством. Отбитый фрезерным рабочим органом уголь попадает на погрузочный стол, откуда нагребавшими лапами подается на скребковый конвейер, который перемещает уголь над классификационной решеткой, мелкие фракции угля просеиваются сквозь щели решетки и собираются в накопитель, для интенсификации процесса на классификационной решетке установлен вибратор. Из накопителя угольная мелочь перемещается системой пневмотранспортирования в контейнер, установленный на поверхности рабочей площадки, специальным транспортным средством производится обмен контейнеров и их доставка к месту переработки. Крупные фракции угля разгрузочным конвейером перемещаются в автосамосвал. **Выводы.** Предлагаемое решение позволит обеспечить удаление угольной мелочи в процессе добычи, что повысит качество угля и снизит отрицательное влияние горных работ на окружающую среду. Существенно уменьшится пыление при загрузке автосамосвала, ведении транспортных и перегрузочных операций, снизятся потери от выдувания и просыпания угля. Использование сменных контейнеров для аккумулялирования угольной мелочи позволит сократить количество специальных транспортных средств, осуществляющих перевозку мелких фракций, и повысит их производительность.

**Ключевые слова:** стреловой комбайн, скребковый транспортер, классификационная решетка, угольная мелочь, система пневмотранспортирования, контейнер, автосамосвал.

© Чебан А.Ю., 2021

### Для цитирования

Чебан А.Ю. Уменьшение пыления при добыче и перевалке угля путем совершенствования выемочного оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 37–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-37-43>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## REDUCING DUST IN MINING AND TRANSFERRING COAL BY IMPROVING MINING EQUIPMENT

Cheban A.Yu.

Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

**Abstract. Relevance and purpose of the study.** Russia is one of the largest coal producers and exporters; about half of the production is exported, while most of the exported coal is shipped through the seaports. With the increase in the coal production and transportation, the negative load on the environment is growing. An important environmental problem is air pollution with coal dust, which can be in the air for a long time and move over considerable distances. Coal fines are intensively blown out during the coal transportation and storage, leading to losses of the mineral, as well as contamination of territories; in addition, fine fractions in coal reduce its quality and market value. **Objective.** The research is aimed at offering rationale for a technical and technological solution providing a reduction in dusting during coal mining and handling by removing fine fractions directly during a mining and loading process using a modernized roadheader, as well as reducing the number of special vehicles that accumulate and transport screened fine coal. **Results.** The paper proposes the design of a modernized roadheader, which ensures the separation of fine coal in the mining process, and the technology of its application. The roadheader is equipped with a scraper conveyor with a classification grid and a dust collection device. The coal chipped off by the milling working tool enters the loading table, from where it is fed to the scraper conveyor by gathering arms, which moves the coal over the classification screen. Fine coal fractions are screened through the screen slots and collected in an accumulator. A vibrator is installed on the classification screen to intensify the process. Coal fines are transported from the accumulator by a pneumatic conveying system to a container installed on the surface of the working platform; containers are exchanged with a special vehicle and delivered to the processing site. Coarse coal fractions are transported by a discharge conveyor to a dump truck. **Conclusions.** The proposed solution will ensure the removal of fine coal during the mining process, which will improve the quality of coal and reduce the negative impact of mining on the environment. Dusting will be significantly reduced, when loading a dump truck, transporting and reloading coal, entailing decreased losses from blowing and spilling coal. The use of removable containers for accumulating fine coal will reduce the number of special vehicles transporting screened fine coal and increase their productivity.

**Keywords:** roadheader, scraper conveyor, classification screen, coal fines, pneumatic conveying system, container, dump truck.

### For citation

Cheban A.Yu. Reducing Dust in Mining and Transferring Coal by Improving Mining Equipment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 37–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-37-43>

### Введение

Российская Федерация является одним из мировых лидеров по добыче и экспорту угля, при этом доля открытой добычи продолжает увеличиваться. Так, если в 2000 году на разрезах было получено около 65% угля, то в настоящее время открытым способом добывается более 75% всего угля [1]. По состоянию на начало 2021 года в угольной отрасли России действовали 121 разрез, 58 шахт, 64 обогатительных фабрики и установки, на которых велось обогащение практически всего коксующегося угля и около 30% энергетических углей [2]. На экспорт отправляется около половины добываемого угля, причем около 90% экспортных поставок приходится на энергетические угли, примерно 65% вывозимого из страны угля отгружается через морские порты страны. С точки зрения наращивания производственного потенциала угольной отрасли наибо-

лее перспективными являются районы Дальнего Востока и Восточной Сибири. Крупнейшими импортерами российского угля являются Китай, Южная Корея и Япония, куда в 2020 году было экспортировано соответственно 37,6, 26,6 и 21,6 млн т угля [2]. В 2020 году через дальневосточные морские порты было отгружено угля на 5,8% больше, чем в 2019 году, при этом в порту Находка рост составил 9,1%, в порту Ванино – 8,5%. Однако вместе с увеличением объемов добычи и экспорта угля растет отрицательная нагрузка на окружающую среду.

### Состояние вопроса и постановка проблемы

Техногенное воздействие при разработке месторождений, перемещении, складировании и переработке горных пород многообразно, значительно и охватывает большие территории [3–6]. Важной экологической проблемой, сопровожда-

ющей процессы рыхления, выемки и погрузки (перегрузки) угля, является загрязнение атмосферного воздуха угольной пылью, которая может находиться в воздухе долгое время и перемещаться на значительные расстояния, угольная пыль образуется из тонких классов угля размером 0–2 мм [7, 8]. Наиболее опасными являются тонкодисперсные частицы, которые при дыхании попадают в легкие, поражают дыхательную систему, вызывают острые и хронические респираторные заболевания, болезни сердца и других органов, пыление снижает видимость, губительно действует на окружающую флору и фауну, кроме того, частицы пыли способны переносить токсичные вещества (тяжелые металлы) и ядовитые органические соединения [9, 10]. В настоящее время большинство угольных терминалов в дальневосточных портах относятся к открытому типу, вследствие чего пыль рассеивается не только по территории промышленной площадки, но и распространяется на жилые массивы, находящиеся вблизи терминалов. Особенно значительно ухудшается ситуация в зимний период, когда применение имеющихся в портах водных систем пылеподавления невозможно [11]. Угольная мелочь интенсивно выдувается при транспортировке и хранении угля, что приводит к потерям полезного ископаемого, а также загрязнению территорий и дополнительной экологической нагрузке на окружающую среду, кроме того, наличие мелких фракций в угле снижает его качество и рыночную стоимость [12].

В настоящее время открытая разработка угольных месторождений в основном ведется с применением традиционных технологий с использованием взрывного рыхления и погрузкой горной массы одноковшовыми экскаваторами. Известны различные технико-технологические решения по отделению из угля мелких фракций непосредственно на рабочей площадке разреза в процессе ведения выемочно-погрузочных работ. Так, технология получения сортового угля в забое, представленная в работе [13], заключается в выемке угля одноковшовым экскаватором с подачей его на мобильный дробильно-сортировочный комплекс, где производится сортировка с выделением угольной мелочи, ссыпaeмой конвейером в штабель на площадке уступа, одновременно сортовой уголь грузится в контейнеры специального транспортного средства. В дальнейшем полученный штабель с угольной мелочью обрабатывается вместе с рядовым углем другим экскаватором. Недостатком технологии является необходимость переэкскавации

угольной мелочи. Известна технологическая схема с применением одноковшового экскаватора и дробильно-сортировочного комплекса. Полученный на сортировочной установке сортовой уголь последовательно грузится в специализированные контейнеры, выделенная угольная мелочь конвейером перемещается в автосамосвал [14]. Общими недостатками технологических решений [13, 14] являются относительно небольшая производительность выемочных машин циклического действия, большое количество оборудования и производственного персонала в забое, а также значительное пыление при перемещении угольной мелочи ленточными конвейерами и ее транспортировке в автосамосвалах.

Известен способ отделения угольной мелочи в процессе перегрузочных работ на скребковом транспортере, снабженном классификационной решеткой. Скребки перемещают угольную массу вдоль решетки, встроенной в днище транспортера, при этом мелкие частицы отделяются от крупных кусков и проваливаются сквозь щели классификационной решетки [15]. Крупные фракции угля направляются в транспортное средство, а угольная мелочь ленточным конвейером складывается в штабель. Недостатком способа является пыление отделенной угольной мелочи при ее перемещении в открытый штабель.

В работе [16] представлена конструкция добычного комплекса, позволяющего обеспечить снижение пыления и удаление угольной мелочи непосредственно при ведении выемочно-погрузочного процесса. Рабочее оборудование добычного комплекса позволяет преобразовывать циклический процесс черпания угля из навала в непрерывный процесс его погрузки в автосамосвалы. Уголь, разгруженный из ковша в приемный бункер с пылезащитным ограждением, просеивается через колосники, при этом крупные куски направляются на дробление, после чего уголь подается на вибропитатель, где из него выделяются тонкие фракции. Пылезащитное ограждение и вибропитатель снабжены аспирационными устройствами для удаления образующейся пыли. Основная масса угля разгрузочным конвейером направляется в автосамосвал, а отделенная и собранная в накопителе тонкая фракция угля системой пневмотранспортирования подается в контейнер специального транспортного средства. Недостатком добычного комплекса является сложность конструкции, что затрудняет его внедрение в производство. Кроме того, необходимо иметь в наличии два специальных транспортных средства, одно из которых простаивает под загрузкой. Также необходимо отметить, что техно-

логии и оборудование, представленное в работах [13, 14, 16], подразумевают применение предварительного взрывного рыхления массива, недостатки которого общеизвестны.

Обеспечить безвзрывную высокопроизводительную выемку каменного угля позволяют технологии с применением горных комбайнов различных конструкций [17–19]. Для уступной отработки угольных массивов используются стреловые карьерные комбайны. Так, стреловые комбайны серии VASM фирмы Alpine Westfalia имеют фрезерный рабочий орган, который поднимается и опускается на стреле при одновременном поступательном и вибрационном движении [17]. Фрезерный рабочий орган рыхлит угольный массив на куски, не требующие дополнительного дробления. Отбитый рабочим органом уголь осыпается на погрузочный стол, находящийся на уровне подошвы забоя, после чего нагребные лапы подают уголь на конвейер в центральной части комбайна. Далее через разгрузочный конвейер уголь подается в транспортное средство. К недостаткам технологии с применением горных комбайнов можно отнести пыление при ведении выемочно-

погрузочных работ, отсутствие функции отделения угольной мелочи.

Целью исследования является разработка технико-технологического решения, обеспечивающего снижение пыления при добыче и перегрузках угля за счет удаления мелких фракций угля непосредственно во время выемочно-погрузочного процесса с применением модернизированного стрелового комбайна, а также сокращение количества специальных транспортных средств, осуществляющих аккумулялирование и перевозку просеянной угольной мелочи.

### Результаты исследования

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается конструкция модернизированного стрелового комбайна, обеспечивающего отделение угольной мелочи в процессе добычи, и технология его применения. Модернизированный стреловой комбайн 1 включает гусеничное ходовое оборудование 2, телескопическую стрелу 3 с фрезерным рабочим органом 4, погрузочный стол 5 с нагребными лапами 6, скребковый транспортер 7, разгрузочный конвейер 8 и другое оборудование (см. рисунок).

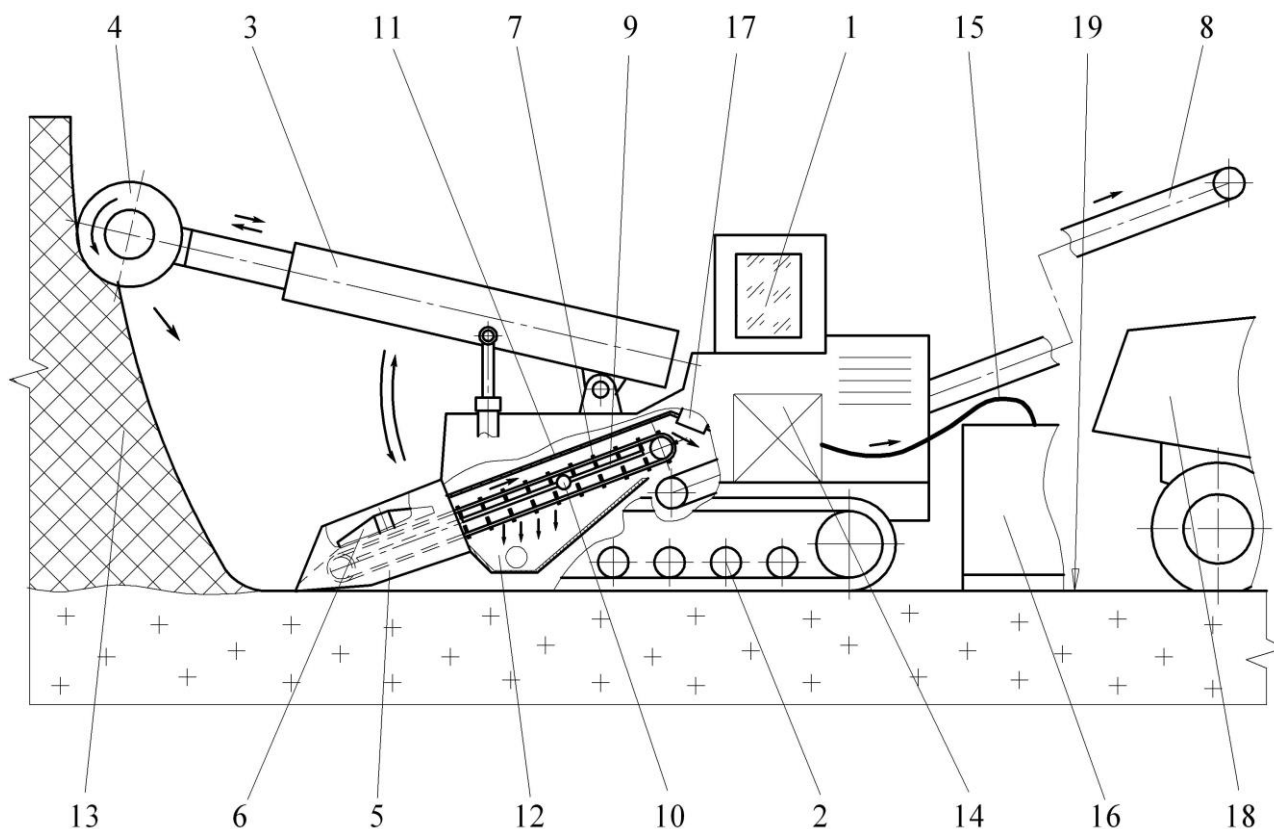


Рис. Модернизированный стреловой комбайн в комплекте с транспортными средствами  
Fig. The modernized roadheader and transportation facilities



Скребковый транспортер 7 снабжен классификационной решеткой 9 на упругих опорах с вибратором 10 и установлен в специальном кожухе 11 с накопителем 12 для угольной мелочи. Стреловой комбайн 1 ведет обработку уступа 13 фрезерным рабочим органом 4. Отбитый уголь осыпается на уровень подошвы забоя на погрузочный стол 5, нагребавшие лапы 6 перемещают уголь в среднюю часть погрузочного стола 6 к скребковому транспортеру 7. Уголь подхватывается верхней ветвью скребкового транспортера 7 и перемещается вдоль щелей классификационной решетки 9, на которую воздействует вибратор 10. Угольная мелочь просеивается сквозь щели классификационной решетки 9 и собирается в накопителе 12, откуда системой пневмотранспортирования 14 по гибкому трубопроводу 15 подается в контейнер 16. Надрешетные фракции угля подаются на разгрузочный конвейер 8, при этом для повышения эффективности удаления тонких фракций и снижения пыления в месте пересыпания угля со скребкового транспортера 7 на разгрузочный конвейер 8 установлено аспирационное устройство 17. Разгрузочным конвейером уголь перемещается в автосамосвал 18. Специальное транспортное средство (на рисунке не показано) оборудованное подъемным механизмом производит обмен контейнеров с установкой контейнера, предназначенного под загрузку (на рисунке не показан), на поверхность 19 рабочей площадки, и подъемом заполненного угольной мелочью контейнера 16 с его последующей транспортировкой к месту разгрузки. Таким образом, появляется возможность обходиться в комплексе транспортного оборудования одним специальным транспортным средством, без ожидания загрузки контейнера. Собранная в контейнеры угольная мелочь может быть использована для изготовления топливных брикетов [20], при этом себестоимость их изготовления ниже, чем в традиционной технологии, поскольку предварительная сортировка по крупности угля уже проведена во время добычных работ.

Количество пыли выделяющейся в атмосферу при ведении погрузочно-разгрузочных работ прямо пропорционально количеству пыли, содержащейся в полученной в процессе добычи угольной массе [21]. Применение средств пылеподавления или сухого обеспыливания позволяет существенно уменьшить пыление при ведении открытых горных работ. Согласно [22] масса пыли, выделяемой оборудованием или процессом, с учетом эффективности средств пылеподавления (обеспыливания) определяется по формуле

$$m' = m(1 - \eta), \quad (1)$$

где  $m$  – масса пыли, выделяемой оборудованием или процессом;  $\eta = 0,75\text{--}0,80$  – эффективность системы сухого обеспыливания [22].

Таким образом, наличие оборудования для отделения угольной мелочи, а также аспирационного устройства позволит в 4–5 раз сократить пыление при загрузке автосамосвалов и последующих операциях при транспортировке и перегрузках угля.

### Выводы

Предлагаемое в статье технико-технологическое решение позволит обеспечить удаление угольной мелочи посредством скребкового транспортера с классификационной решеткой и вибратором непосредственно в процессе добычи угля, что повысит качество угля и снизит отрицательное влияние горных работ на окружающую среду. Отсутствие в угле мелких и тонких фракций позволит существенно сократить пыление при загрузке автосамосвала, ведении транспортных и перегрузочных операций, а также снизить потери угля от выдувания и просыпания. Снижение пыления позволит улучшить условия труда производственного персонала угольного разреза, грузового порта, а также повысит качество жизни граждан, проживающих на прилегающих территориях. Использование сменных контейнеров для аккумулялирования угольной мелочи позволит сократить количество специальных транспортных средств, осуществляющих перевозку мелких фракций угля, и повысит их производительность. Полученная угольная мелочь может быть использована для изготовления топливных брикетов.

### Список литературы

1. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2018 года // Уголь. 2019. № 3. С. 64–79.
2. Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2020 года // Уголь. 2021. № 3. С. 27–43.
3. Jain R.K., Cui Z., Domen J.K. Environmental impact of mining and mineral processing, Butterworth-Heinemann. 2016. 307 p.
4. Jiuping Xu. Ecological coal mining based dynamic equilibrium strategy to reduce pollution emissions and energy consumption // Journal of Cleaner Production. 2017, no. 11, pp. 514–529.
5. Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 3. С. 18–23.

6. Coal Production and Processing Technology / Ed. by M. R. Riazi, R. Gupta. Taylor & Francis Group, LLC. 2016. 535 p.
7. Чебан А.Ю. Технология разработки угольного месторождения с применением выемочно-погрузочного комплекса // Маркшейдерский вестник. 2019. № 4. С. 55–59.
8. Rong Zh. New insights into the permeability-increasing area of over-lying coal seams disturbed by the mining of coal // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. no. 1, pp. 352–364.
9. Ворошилов Я.С., Фомин А.И. Влияние угольной пыли на профессиональную заболеваемость работников угольной отрасли // Уголь. 2019. № 4. С. 20–25.
10. Трипати Д.П., Даш Т.Р. Оценка загрязнения воздуха микроэлементами и частицами взвешенной пыли на высокомеханизированном угольном карьере // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 4. С. 188–200.
11. Перспективы экспорта российского угля и экологические проблемы строительства и эксплуатации угольных терминалов Дальнего Востока / Агошков А.И., Блиновская Я.Ю., Голохваст К.С., Куksин Д.В. // Горный журнал. 2015. № 3. С. 56–60.
12. Чебан А.Ю. Способ добычных работ для малых угольных разрезов с применением усовершенствованного карьерного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 2. С. 36–42.
13. Демченко И.И., Муленкова А.О. Технико-экономическое обоснование получения сортового угля в забое Балахтинского разреза Красноярского края // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 1. С. 36–47.
14. Демченко И.И., Муленкова А.О. О возможности размещения перерабатывающего оборудования в забое разреза для получения сортового угля // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 8. С. 26–32.
15. Пат. 2363551 Российская Федерация, МПК В07В1/00. Способ классификации угля / А.А. Артушкевич О.А. Артушкевич В.А. Артушкевич; заявитель и патентообладатель Артушкевич А.А. №2006132967/03; заявл. 13.09.2006; опубл. 10.08.2009.
16. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П. Снижение запыленности при добыче и перевалке угля на основе модернизации горного оборудования // Уголь. 2020. № 1. С. 65–67.
17. Пехам Х. Новая технология выемки пород на карьерах // Горная промышленность. 1995. № 4. С. 44–47.
18. Горев Д.Е. Совершенствование технологии разработки многопластовых крупных буроугольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 175–185.
19. Чебан А.Ю. Классификация конструкций карьерных комбайнов // Недропользование XXI век. 2015. № 5. С. 64–69.
20. Шувалов Ю.В., Тарасов Ю.Д., Никулин А.Н. Обоснование рациональных технологий получения топливно-энергетического сырья на основе твердых горючих углесодержащих отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 8. С. 243–247.
21. Адамков А.В. Состояние запыленности воздуха в забоях подготовительных выработок при работе проходческих комбайнов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2004. №1. С. 56–59.
22. Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей) / Министерство топлива и энергетики РФ - ИГД им. А.А. Сковинского. Люберцы, 1999. 68 с.

## References

1. Tarazanov I.G. Russia's coal industry performance for January – December of 2018. *Ugol [Coal]*, 2019, no. 3, pp. 64–79. (In Russ.)
2. Tarazanov I.G., Gubanov D.A. Russia's coal industry performance for January – December of 2020. *Ugol [Coal]*, 2021, no. 3, pp. 27–43. (In Russ.)
3. Jain R.K., Cui Z., Domen J.K. Environmental impact of mining and mineral processing, Butterworth-Heinemann, 2016, 307 p.
4. Jiuping Xu. Ecological coal mining based dynamic equilibrium strategy to reduce pollution emissions and energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 2017, no. 11, pp. 514–529.
5. Cheban A.Yu. Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 3, pp. 18–23. (In Russ.)
6. Riazi M.R., Gupta R. Coal production and processing technology. Taylor & Francis Group, LLC, 2016, 535 p.
7. Cheban A.Yu. Technology of development of a coal deposit with the use of extremely-loading complex. *Marksheiderskii vestnik* [Mine Surveying Bulletin], 2019, no. 4, pp. 55–59. (In Russ.)
8. Rong Zh. New insights into the permeability-increasing area of overlying coal seams disturbed by the mining of coal. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, no. 1, pp. 352–364.
9. Voroshilov Ya.S., Fomin A.I. The influence of coal dust on the occupational morbidity of workers in the coal industry. *Ugol [Coal]*, 2019, no. 4, pp. 20–25. (In Russ.)
10. Tripathy D.P., Dash T.R. Assessment of particulate and trace element pollution in airborne dust around a highly mechanized opencast coal mine in Talcher, Odisha. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science], 2018, no. 4, pp. 188–200. (In Russ.)
11. Agoshkov A.I., Blinovskaya Ya.Yu., Golokhvast K.S., Kuksin D.V. Prospects for Russian coal export and environment issues of construction and operation of coal terminals in the Far East. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2015, no. 3, pp. 56–60. (In Russ.)
12. Cheban A.Yu. Method of exercise work for small coal cuts with the application of an advanced mine operating combine. *Gornyi informatsionno-analiticheskii*

- byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2019, no. 2, pp. 36–42. (In Russ.)
13. Demchenko I.I., Molenkova A.O. Feasibility study for producing sized coal in the face of the Balakhtinsky open pit mine of the Krasnoyarsk Territory. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2019, no. 1, pp. 36–47. (In Russ.)
  14. Demchenko I.I., Molenkova A.O. On the possibility of placing processing equipment in the face of the open pit to produce sized coal. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [Universities' Proceedings. Mining Journal], 2017, no. 8, pp. 26–32. (In Russ.)
  15. Artushkevich A.A., Artushkevich O.A., Artushkevich V.A. *Sposob klassifikatsii uglya* [Method of classifying coal]. Patent RF, no. 2363551, 2009.
  16. Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Dust reduction during coal mining and transshipment by modernizing mining equipment. *Ugol* [Coal], 2020, no. 1, pp. 65–67. (In Russ.)
  17. Peham H. New technology of rock excavation at quarries. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 1995, no. 4, pp. 44–47. (In Russ.)
  18. Gorev D.E. Improving the technology of development of multi-layer large brown coal deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2016, no. 7, pp. 175–185. (In Russ.)
  19. Cheban A.Yu. Classification of structures of surface miners. *Nedropolzovanie XXI vek*. [Subsoil Use in the 21st Century], 2015, no. 5, pp. 64–69. (In Russ.)
  20. Shuvalov Yu.V., Tarasov Yu.D., Nikulin A.N. Providing rationale for feasible technologies used to produce fuel and energy raw materials by applying solid combustible coal-containing wastes. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2011, no. 8, pp. 243–247. (In Russ.)
  21. Adamkov A.V. Dust content of air in the faces of the preliminary development during the operation of roadheaders. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Kuzbass State Technical University], 2004, no. 1, pp. 56–59. (In Russ.)
  22. Metodika rascheta vrednykh vybrosov (sbrosov) dlya kompleksa oborudovaniya otkrytykh gornykh rabot (na osnove udelnykh pokazatelei) [Methodology for calculating hazardous emissions (discharges) for a complex of equipment for open pit mining (based on specific indicators)]. The Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation – Skochinsky Institute of Mining, Lyubertsy, 1999, 68 p. (In Russ.)

Поступила 14.07.2021; принята к публикации 18.08.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 14/07/2021; revised 18/08/2021; published 27/09/2021

**Чебан Антон Юрьевич** – ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия.  
Email: chebanay@mail.ru

**Anton Yu. Cheban** – Lead Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia.  
Email: chebanay@mail.ru

# ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

## RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.334:532.741:546.492:661.691.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-44-53



### КИНЕТИКА ЦЕМЕНТАЦИИ РТУТИ И СЕЛЕНА НА АЛЮМИНИИ

Королев А.А., Шунин В.А., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Воинков Р.С.

АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия

**Аннотация. Постановка задачи.** Актуальность работы определяется необходимостью совершенствования и оптимизации существующей комплексной многооперационной технологии переработки поликомпонентного медьэлектролитного шлама, в частности для селективного выделения, концентрирования и очистки селена при получении товарного продукта. Действующая технология предусматривает цементационное осаждение селена на алюминиевом порошке с последующей обработкой пиро- и гидрометаллургическими способами: сплавление со смесью нитрата и хлорида аммония; выщелачивание растворами сульфидов и сульфитов натрия и аммония; обработка Se-Hg-шламов алюминиевым порошком в щелочной среде для восстановления ртути и выделения в виде отдельной фазы; выщелачивание цементационного осадка раствором серной кислоты; электровыщелачивание цементационного осадка в растворе едкого натра; растворение сульфитным раствором в присутствии тиомочевины или тиосульфата натрия, едкого натра, сульфида натрия для связывания ртути; выщелачивание в бисульфите натрия. **Цель работы.** Исследование кинетики начальной стадии – цементации макро- и микрокомпонентов (селен/ртуть) раствора выщелачивания медьэлектролитного шлама на металлическом алюминии, во многом определяющей общую скорость комплексной технологии получения товарного селена. **Используемые методы.** Параметры цементационного осаждения селена в зависимости от температуры раствора, скорости вращения диска, исходной концентрации компонентов раствора, определены методом вращающегося алюминиевого диска, который обеспечивает наиболее корректные кинетические данные, благодаря равнодоступности поверхности в диффузионном отношении. О скорости цементационного осаждения селена и ртути судили по уменьшению концентрации металлов за определенный промежуток времени в жидкой фазе; константу скорости цементации/растворения определяли, исходя из механизма восстановления ионов цементируемого металла, протекающего на предельном токе, когда осаждение осуществляется на внешней поверхности катодных участков диска, которая остается постоянной на протяжении всего процесса. **Новизна.** В условиях равнодоступной поверхности вращающегося диска изучены зависимости удельных скоростей процессов цементационного осаждения селена и ртути в широких диапазонах величин влияющих параметров: температура и состав растворов, скорость вращения алюминиевого диска. Установлены режимы протекания и определены детали механизма изученных процессов. **Результат.** Кинетические параметры ( $W \cdot 10^{-6}$ , г-ат/дм<sup>2</sup>·с;  $K \cdot 10^{-6}$ , с<sup>-1</sup>;  $D \cdot 10^{-11}$ , м<sup>2</sup>/с) процесса цементации селена/ртути имеют тенденцию к возрастанию при увеличении следующих параметров системы: концентрация компонентов Se/Hg,  $C_i = (10-100)/(0,003-0,2)$  г/дм<sup>3</sup>;  $W = (4,7-180)/(0,008-1,4)$ ;  $K = (1,9-7,6)/(28,6-73,5)$ ;  $D = (1,5-89)/(0,006-1,0)$ ; скорость перемешивания растворов Se/Hg,  $\omega = 17-73$  рад/с;  $W = (156-180)/(1,2-1,4)$ ;  $K = (6,6-7,6)/(29-73)$ ;  $D = (69-89)/(0,9-1,1)$ ; температура растворов Se/Hg,  $T = 293-323^\circ\text{C}$ ;  $W = (156-208)/(0,8-3,1)$ ;  $K = (6,6-8,7)/(42-174)$ ;  $D = (69-125)/(0,6-2,3)$ . **Практическая значимость.** Получены исходные данные для оптимизации режима цементации: при достижении условий стационарного процесса уравниваются скорости восстановления селена, образования селенида ртути, формирования элементной ртути и алюминиевой соли селеновой/селенистой кислоты. Информация по кинетике цементационного осаждения на алюминии позволяет разработать технологические рекомендации по извлечению селена из технологических растворов.

**Ключевые слова:** ртуть, селен, алюминий, цементация, кинетика, шлам, раствор, выщелачивание, осадок, диск, концентрация, скорость.

© Королев А.А., Шунин В.А., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Воинков Р.С., 2021

#### Для цитирования

Кинетика цементации ртути и селена на алюминии / Королев А.А., Шунин В.А., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Воинков Р.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 44–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-44-53>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# KINETICS OF MERCURY AND SELENIUM PRECIPITATION ON ALUMINUM

Korolev A.A., Shunin V.A., Timofeev K.L., Maltsev G.I., Voinkov R.S.

JSC URALLELEKTROMED, Verkhnyaya Pyshma, Russia

**Abstract. Problem Statement.** The relevance of the research is determined by the need to improve and optimize the existing complex multi-operational technology for processing multicomponent copper anode sludge, in particular, for selective precipitation, concentration and purification of selenium when making a commercial product. The current technology provides for the selenium precipitation on aluminum powder with subsequent treatment by pyro- and hydrometallurgical methods: fusion with a mixture of nitrate and ammonium chloride; leaching with solutions of sodium and ammonium sulfides and sulfites; treatment of Se-Hg slurries with aluminum powder in an alkaline medium to reduce mercury and make it precipitate as a separate phase; leaching of the precipitation with a solution of sulfuric acid; electro-leaching of the precipitation in a solution of sodium hydroxide; dissolution with a sulfite solution in the presence of thiourea or sodium thiosulfate, sodium hydroxide, sodium sulfide to bind mercury; leaching in sodium bisulfite. **Objective.** The research is aimed at studying kinetics of the initial stage – precipitation of macro- and microcomponents (selenium/mercury) of the leaching solution of copper anode sludge on metallic aluminum, which largely determines the overall speed of the complex technology for producing commercial selenium. **Methods Applied.** The parameters of the selenium precipitation, depending on the solution temperature, the disk rotation speed, the initial concentration of the components of the solution, are determined by the method of a rotating aluminum disk, which provides the most correct kinetic data due to the equal accessibility of the surface in the diffusion ratio. The precipitation rate of selenium and mercury was judged by the decrease in the concentration of metals over a certain period of time in the liquid phase; the constant of the precipitation/dissolution rate was determined based on the mechanism of reduction of ions of the precipitated metal flowing at limiting current, when metals are deposited on the outer surface of the cathode sections of the disk, which remains constant throughout the entire process. **Originality.** Under conditions of an equally accessible surface of a rotating disk, we studied the dependences of the specific velocities of selenium and mercury precipitation processes in a wide range of the influencing parameters: the temperature and composition of solutions, the rotation speed of the aluminum disk. The flow modes are established and the details of the mechanism of the studied processes are determined. **Findings.** Kinetic parameters ( $W \cdot 10^{-6}$ , g-at/dm<sup>2</sup>s;  $K \cdot 10^{-6}$ , s<sup>-1</sup>;  $D \cdot 10^{-11}$ , m<sup>2</sup>/s) of the selenium/mercury precipitation process tends to increase with an increase in the following system parameters: the concentration of components Se/Hg,  $C_i = (10-100)/(0.003-0.2)$  g/dm<sup>3</sup>;  $W = (4.7-180)/(0.008-1.4)$ ;  $K = (1.9-7.6)/(28.6-73.5)$ ;  $D = (1.5-89)/(0.006-1.0)$ ; mixing speed of solutions Se/Hg,  $\omega = 17-73$  rad/s;  $W = (156-180)/(1.2-1.4)$ ;  $K = (6.6-7.6)/(29-73)$ ;  $D = (69-89)/(0.9-1.1)$ ; temperature of solutions Se/Hg,  $T = 293-323^\circ\text{C}$ ;  $W = (156-208)/(0.8-3.1)$ ;  $K = (6.6-8.7)/(42-174)$ ;  $D = (69-125)/(0.6-2.3)$ . **Practical Relevance.** We have obtained initial data for optimizing the precipitation mode: when the steady process conditions are reached, the rates of selenium reduction, mercury selenide formation, the formation of elemental mercury and aluminum salt of selenic/selenous acid are balanced. Information on the kinetics of precipitation on aluminum allows us to develop technological recommendations for the extraction of selenium from technological solutions.

**Keywords:** mercury, selenium, aluminum, precipitation, kinetics, sludge, solution, leaching, sediment, disk, concentration, speed.

## For citation

Korolev A.A., Shunin V.A., Timofeev K.L., Maltsev G.I., Voinkov R.S. Kinetics of Mercury and Selenium Precipitation on Aluminum. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 44–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-44-53>

## Введение

Известен ряд схем и технологий по комплексной переработке медеэлектролитного шлама с выделением отдельных компонентов при получении соответствующих товарных продуктов. Например, при получении селена для очистки растворов от примесей тяжелых металлов селен и ртуть осаждают цементацией на Al-порошке с последующей его переработкой пиро- или гидрометаллургическими способами: сплав-

ление с  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  в присутствии  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ; выщелачивание растворами реагентов ( $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ ); обработка Se-Hg-шламов Al-порошком в щелочной среде для восстановления ртути и выделения в виде отдельной фазы; выщелачивание цементационного осадка раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; электровыщелачивание цементационного осадка в растворе NaOH; растворение сульфитным раствором в присутствии тиомочевина или тиосульфата натрия и едкого натра с добавками  $\text{Na}_2\text{S}$  для связывания ртути; выщела-

чивание в бисульфите натрия [1–6]. Учитывая многостадийность и громоздкость существующих технологий переработки медьэлектролитного шлама, актуальным является вопрос оптимизации и упрощения известных способов и отдельных операций сложных пиро- и гидрометаллургических схем переработки полиметаллического сырья. Конечной целью должно служить создание экологически безопасных, технологически эффективных и экономически выгодных высокопроизводительных схем по переработке сложных по составу промпродуктов и отходов [7–13]. Принимая во внимание, что начальной стадией переработки селенсодержащих растворов является цементация макро- и микрокомпонентов (селен/ртуть) на металлическом алюминии, именно кинетика этого процесса во многом определяет общую скорость всей технологии получения товарного селена, в связи с чем целью работы является выявление закономерностей и количественных параметров цементационного осаждения селена на металлическом алюминии в зависимости от температуры и состава растворов и скорости перемешивания системы при использовании метода вращающегося диска. Полученные данные позволят оптимизировать процесс выделения селена из растворов и впоследствии могут быть использованы при разработке технологических регламентов получения товарного селена.

### Методика исследований

Проведены исследования кинетики последовательной цементации макро- и микрокомпонентов (селен/ртуть) раствора ( $V = 0,1\text{--}1\text{ дм}^3$ ) на металлическом алюминии методом вращающегося диска ( $S = 5,27\text{ см}^2$ ) в зависимости от следующих параметров процесса:

- температура раствора ( $T = 298\text{--}328\text{ К}$ );
- скорость вращения диска ( $\omega = 17\text{--}73\text{ рад/с}$ );
- исходная концентрация компонентов раствора  $C_0$ , г/дм<sup>3</sup>: 10–100 Se; 0,003–0,22 Hg.

Метод вращающегося диска является наиболее простым и совершенным способом изучения кинетики и деталей механизма процессов растворения. Метод обеспечивает хорошую воспроизводимость кинетических данных, обладает лучшими показателями эффективности при выяснении влияния ряда переменных факторов (температуры, концентрации реагентов, pH, наличия пассивирующих и активирующих примесей и т.д.). При ламинарном режиме вследствие сложения вращательной (тангенциальной), радиальной и осевой скоростей общая скорость

движения жидкости относительно поверхности диска одинакова во всех точках, расположенных на одинаковом расстоянии от поверхности диска. В результате обеспечивается одинаковая толщина эффективного диффузионного слоя над любой точкой поверхности диска, независимо от расстояния ее от оси вращения, т.е. равнодоступность поверхности, которая обеспечивает в каждой точке диска одинаковое количество подводимого реагента в единицу времени, постоянную концентрацию вещества у поверхности и скорость реакции на ней [17–21].

О кинетике цементации селена и ртути судили по убыли массы элементов в жидкой фазе, рассчитанную по уменьшению концентрации металлов за определенный промежуток времени. Удельную скорость цементации селена и ртути  $W_i$ , моль/дм<sup>2</sup>·с, определяли по формуле

$$W_i = \frac{dm_i}{S \cdot A \cdot d\tau},$$

где  $dm_i$  – количество цементируемого/растворяемого металла в единицу времени, моль/с;  $\tau$  – продолжительность процесса с;  $S$  – площадь диска, дм<sup>2</sup>;  $A_i$  – атомный вес цементируемого металла.

Константу скорости цементации/растворения  $K_i$ , с<sup>-1</sup>, определяли исходя из механизма восстановления ионов цементируемого металла, протекающего на предельном токе, когда осаждение осуществляется на внешней поверхности катодных участков, которая остается постоянной на протяжении всего процесса:

$$\ln C_\tau = \ln C_0 - K_i \cdot \tau,$$

где  $C_0$  и  $C_\tau$  – концентрации цементируемого металла в растворе соответственно исходная и в момент времени  $\tau$ , г/дм<sup>3</sup>.

Плотность диффузионного потока

$$j_i = \frac{dm_i}{S \cdot dt}.$$

Количество цементируемого/растворяемого  $i$ -компонента

$$dm_i = -D_i \frac{dp}{dx} dS \cdot dt,$$

где  $D_i$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $dp/dx$  – градиент плотности, кг/м<sup>4</sup>.

Коэффициент диффузии  $D_i$  при цементации/растворении рассчитывали по уравнению

$$D_i = -dm_i \frac{dx}{dp} dS \cdot dt,$$

где  $\rho_{Al} = 2,7 \cdot 10^6$  г/м<sup>3</sup>;  $dx$  – толщина диффузного слоя на Al-диске ( $\delta \approx 1 \cdot 10^{-3}$  м).

Кажущиеся порядки реакции цементации/растворения рассчитывали по уравнению

$$n_i = \frac{\Delta \ln W_i}{\Delta \ln C_i},$$

где  $C_i$  – концентрация цементируемого/растворяемого компонента.

Вычисление величины кажущейся энергии активации цементации/растворения  $E_i$ , кДж/моль, проводили по следующим формулам:

$$E_i = k \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1};$$

$$E_i = -R \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{K_2}{K_1},$$

с проверкой по графической зависимости « $\ln \frac{D_2}{D_1} - \frac{1}{T}$ » или « $\ln K_i - \frac{1}{T}$ » [14–16].

### Результаты и их обсуждение

Результаты, полученные при исследовании влияния температуры растворов  $T = 293–323$  К, скорости вращения Al-диска  $S = 5,27$  см<sup>2</sup>;  $\omega = 17–73$  рад/с и исходной концентрации элементов, г/дм<sup>3</sup>: 10–100 Se; 0,003–0,22 Hg, на цементацию металлов, представлены в табл. 1 и на рис. 1–3.

Установлено, что кинетические параметры ( $W \cdot 10^{-6}$ , г-ат/дм<sup>2</sup>·с;  $K \cdot 10^{-6}$ , с<sup>-1</sup>;  $D \cdot 10^{-11}$ , м<sup>2</sup>/с) процесса цементации селена/ртути и обратного ему явления растворения металлического алюминия при постоянной площади Al-диска имеют тенденцию к возрастанию при увеличении следующих параметров системы:

– концентрация монорастворов Se/Hg,  $C_i = (10–100)/(0,003–0,22)$  г/дм<sup>3</sup>;  
 $W = (4,67–180,2)/(0,008–1,432)$ ;  
 $K = (1,93–7,57)/(28,65–73,45)$ ;  
 $D = (1,47–88,7) / (0,006–1,064)$ ;

– скорость перемешивания монорастворов Se/Hg,  $\omega = 17–73$  рад/с;  
 $W = (156,2–180,2)/(1,162–1,432)$ ;  
 $K = (6,56–7,57)/(28,65–73,45)$ ;  
 $D = (68,8–88,7) / (0,863–1,064)$ ;

– температура монорастворов Se/Hg,  $T = 293–323$ °C;  
 $W = (156,2–208,3)/(0,840–3,102)$ ;  
 $K = (6,56–8,73)/(41,91–173,56)$ ;  
 $D = (68,8–124,9) / (0,624–2,304)$ .

Величины кажущейся энергии активации процесса цементации/растворения для монорастворов Se/Hg с проверкой по графической зависимости « $\ln K_i - 1/T$ » в низкотемпературном интервале ( $T = 293–323$  К) (см. рис. 2) составили  $E_i = 5,76/26,42$  кДж/моль, что характерно для процессов, протекающих в кинетической и переходной областях.

Физический смысл порядка для элементарных (одностадийных) химических реакций заключается в количестве одновременно изменяющихся концентраций и может быть равен сумме коэффициентов в стехиометрическом уравнении реакции, однако рассчитывается исключительно из экспериментальных данных и зависит от условий проведения реакции. Кажущиеся порядки реакции, определенные по концентрационным зависимостям металлов Se/Hg в координатах « $\ln j_i - \ln C_i$ » (см. рис. 3), имеют значения  $n < 2$ , а именно 1,78/1,19, что подтверждает соответствие процесса цементация/растворение реакции первого порядка.

Таблица 1. Кинетические параметры цементации селена и ртути  
 Table 1. Kinetic parameters of selenium and mercury precipitation

Se/Hg, г/дм <sup>3</sup>	ω, рад/с	T, К	W·(10 <sup>-4</sup> /10 <sup>-6</sup> ), моль/дм <sup>2</sup> ·с	K·10 <sup>-6</sup> , с <sup>-1</sup>	D·(10 <sup>-9</sup> /10 <sup>-11</sup> ), м <sup>2</sup> /с	E <sub>Se/Hg</sub> , кДж/моль
10/0,003	73	308	0,0467/0,0078	1,93/28,65	0,0147/0,0058	5,76/26,42
40/0,012			0,454/0,108	4,76/104,01	0,177/0,080	
– /0,120			– /1,058	– /102,0	– /0,786	
100/0,22			1,802/1,432	7,57/73,45	0,887/1,064	
	17	1,562/1,162	6,56/28,65	0,688/0,863		
	39	1,722/1,274	7,21/64,83	0,803/0,947		
	73	293	1,562/0,840	6,56/41,91	0,688/0,624	
		323	2,083/3,102	8,73/173,56	1,249/2,304	

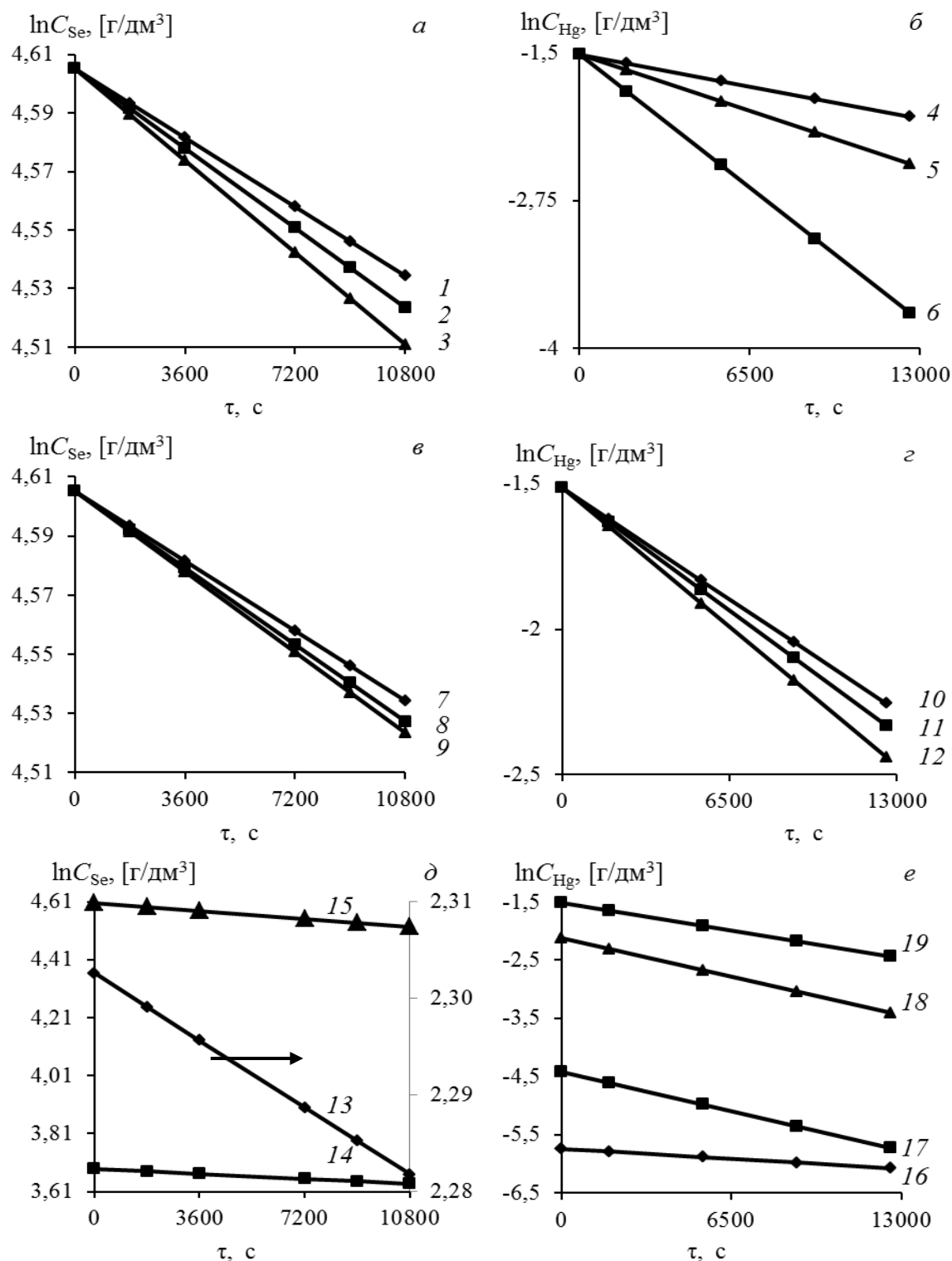


Рис. 1. Влияние продолжительности цементации на концентрацию селена (а, в, д) и ртути (б, г, е) из монорастворов на Al-диске при изменяющихся параметрах: а, б –  $T$ , К: 293 (1, 4); 308 (2, 5); 323 (3, 6); в, г –  $\omega$ , рад/с: 17 (7, 10); 39 (8, 11); 73 (9, 12); д, е – Se, г/дм<sup>3</sup>: 10 (13); 40 (14); 100 (15); Hg·10<sup>-3</sup>, г/дм<sup>3</sup>: 3 (16); 12 (17); 120 (18); 220 (19)

Fig. 1. The effect of precipitation duration on the concentration of selenium (а, в, д) and mercury (б, г, е) from mono-solutions on an Al disk at changing parameters: а, б is  $T$ , K: 293 (1, 4); 308 (2, 5); 323 (3, 6); в, г is  $\omega$ , rad/s: 17 (7,10); 39 (8,11); 73 (9,12); д, е is Se, g/dm<sup>3</sup>: 10 (13); 40 (14); 100 (15); Hg·10<sup>-3</sup>, g/dm<sup>3</sup>: 3 (16); 12 (17); 120 (18); 220 (19)



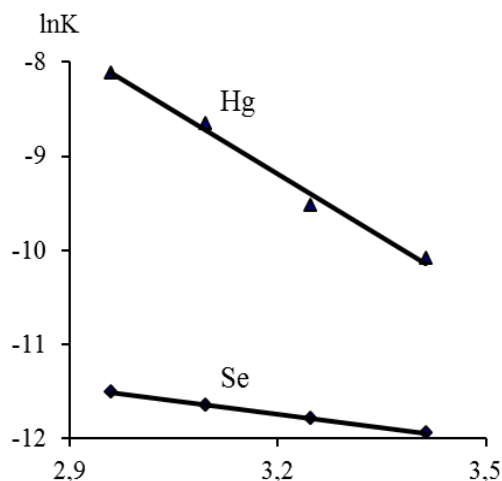


Рис. 2. Зависимость константы скорости цементации Se/Hg от температуры  
Fig. 2. Dependence of the precipitation rate constant Se/Hg on temperature

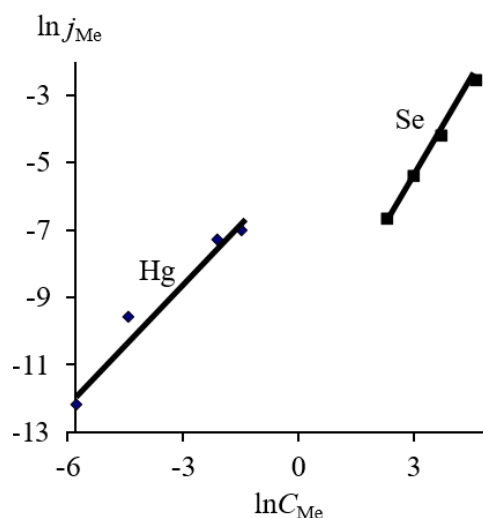


Рис. 3. Зависимость плотности диффузионного потока цементации  
Fig. 3. Dependence of the density of the diffusion flow of cementation

Метод вращающегося диска информативен тем, что позволяет в общем гетерогенном процессе цементация/растворение идентифицировать диффузионную и кинетическую стадии, когда фактическая скорость реакции обусловлена двумя факторами: скоростью самой химической реакции и динамикой диффузионного массопереноса реагента к поверхности взаимодействия. Для расчетов использован «квазистационарный» метод или «равнодоступной поверхности», когда диффузионный массоперенос и химическая реакция на поверхности не зависят друг от друга, применяемый для однородной поверхности с одинаковыми свойствами, все участки которой открыты для диффузии.

В устоявшемся стационарном режиме скорость химической реакции, моль/м<sup>2</sup>·с,

$$w = k \cdot (C_s)^n,$$

где  $k$  – константа скорости процесса цементации/растворения, м/с (для реакции первого порядка);  $C_s$  – концентрация компонента у поверхности Al-диска, моль/м<sup>3</sup>;  $n$  – порядок реакции (для модели первого порядка  $n = 1$ ).

Скорость химической реакции равна количеству реагента, доставляемому к поверхности путём диффузии, то есть диффузионному потоку на поверхность:

$$w = |j|.$$

Плотность диффузионного потока определяется эмпирическим выражением:

$$j = \beta \cdot (C_v - C_s),$$

где  $C_v$  – концентрация компонента в объеме раствора, моль/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент массопереноса или константа скорости диффузии, м/с.

Для равнодоступной поверхности и реакции первого порядка справедливо

$$k \cdot C_s = \beta \cdot (C_v - C_s), \quad C_s = \frac{\beta \cdot C_v}{k + \beta}.$$

Скорость реакции  $w$  выражается через концентрацию  $C_v$ :

$$w = k \cdot C_s = k \cdot \frac{\beta \cdot C_v}{k + \beta}.$$

$k_{\text{эф}} = k \cdot \beta / (k + \beta)$  – эффективная константа скорости, определяемая кинетической ( $k$ ) и диффузионной ( $\beta$ ) составляющими.

Суммарное кинетическое сопротивление

$$\frac{1}{k_{\text{эф}}} = \frac{1}{k} + \frac{1}{\beta}.$$

При высокой скорости химической реакции ( $k \gg \beta$ ),  $k_{\text{эф}} = \beta$ , лимитирующей стадией является диффузия; при низкой скорости химической реакции ( $k \ll \beta$ ),  $k_{\text{эф}} = k$ , последняя определяет общую скорость процесса цементации/растворения.

В диффузионной кинетике оперируют понятием «пограничный слой», который стационарно существует около реакционной поверхности и не затрагивается перемешиванием. Прохождение вещества через пограничный слой толщиной  $\delta$  достигается за счет диффузии и влияет на скорость химической реакции. На реакционной по-

верхности при  $x = 0$   $C = C_s$ ; на внешней границе слоя при  $x = \delta$   $C = C_v$ . При стационарном режиме  $dC/dt = 0$ , согласно II-у закону Фика  $d^2C/dx^2 = 0$ ,  $dC/dx = \text{const}$ . В результате

$$C_x = C_v \frac{x}{\delta} + C_s \cdot \left(1 - \frac{x}{\delta}\right).$$

Распределение концентрации компонента в пограничном слое:

$$\frac{dC}{dx} = \frac{C_v - C_s}{\delta};$$

$$j = -D \frac{C_v - C_s}{\delta};$$

$$\beta = \frac{D}{\delta}.$$

При обработке опытных данных по цементированию/растворению селена и ртути из монокомпонентных растворов (табл. 2) показано:

- константа скорости диффузии  $\beta_i = 1,054$  м/с, зависит от переменного параметра – разности концентраций элемента в объеме раствора и у поверхности Al-диска ( $C_v - C_s$ ); поскольку  $C_v$  и  $C_s$  соизмеримы,  $\beta$  является величиной постоянной и одинаковой для селена и ртути, определяемой значениями площади диска  $S$  и продолжительностью процесса  $\tau$  и не зависящей от абсолютной величины концентрации элемента  $C_i$ ;

- величины константы скорости химической реакции цементация/растворение для Se/Hg  $k \cdot 10^{-2}$ , м/с: (0,37–1,44)/(5,52–14,88), которые на порядок больше для ртути, чем для селена, определяются плотностью диффузионного потока  $j$ , моль/м<sup>2</sup>·с: (0,47–18,0)/(0,0008–0,143) и, опосредованно, концентрацией элемента у поверхности Al-диска  $C_s$ , моль/м<sup>3</sup>: (126–1249)/(0,014–0,961);

- наличие слабой зависимости константы скорости химической реакции от скорости перемешивания раствора для обоих элементов ( $\omega = 17$ –73 рад/с)  $k \cdot 10^{-2}$  Se/Hg, м/с: (1,25–1,44)/(11,76–14,88), и температуры ( $T = 293$ –323 К) для селена, в сравнении со рту-

тью,  $k \cdot 10^{-2}$  Se/Hg, м/с: (1,25–1,67)/(8,26–38,66), что соответствует различным уровням энергии активации элементов  $E_{\text{Se/Hg}}$ , кДж/моль = 5,76/26,42;

- превышение значений константы скорости диффузии  $\beta_i$  над константами скорости химической реакции  $k_i$  для Se/Hg в  $\sim(100\text{--}300)/(3\text{--}20)$  раз позволяет сделать вывод об отсутствии затруднений конвективной диффузии при цементации селена и частично ртути, для которой процесс смещен из кинетической в переходную (к диффузионной) область.

При цементации на Al-диске из бинарного раствора, г/дм<sup>3</sup>: 100 Se; 0,22 Hg на протяжении первых  $\sim$ трех часов происходит выделение только элементного селена и лишь затем начинают восстанавливаться ионы ртути (рис. 4).

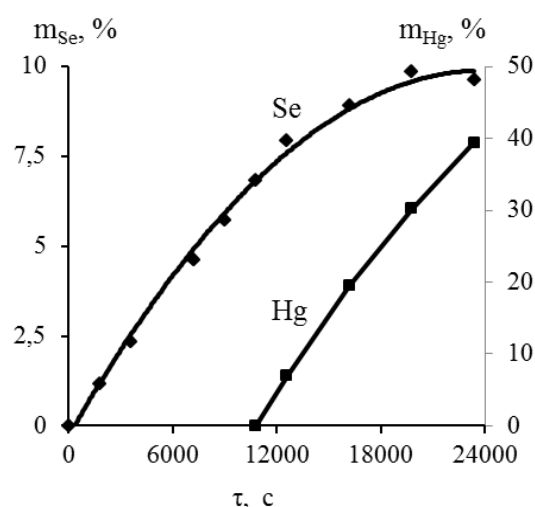


Рис. 4. Влияние продолжительности цементации на выделение селена и ртути на Al-диске из бинарного раствора состава, г/дм<sup>3</sup>: 100 Se; 0,22 Hg, при  $T = 293$  К;  $\omega = 73$  рад/с

Fig. 4. The effect of precipitation duration on the separation of selenium and mercury on the Al disk from a binary solution of the composition, g/dm<sup>3</sup>: 100 Se; 0.22 Hg, at  $T = 293$  K;  $\omega = 73$  rad/s

Таблица 2. Характеристики диффузионных и кинетических стадий цементации Se/Hg

Table 2. Characteristics of the diffusion and kinetic stages of Se/Hg precipitation

$C_v(\text{Se} \cdot 10^2/\text{Hg})$ , моль/м <sup>3</sup>	$\omega$ , рад/с	$T$ , К	$C_s(\text{Se} \cdot 10^2/\text{Hg})$ , моль/м <sup>3</sup>	$j(\text{Se/Hg})$ , моль/м <sup>2</sup> ·с	$k \cdot 10^{-2} (\text{Se/Hg})$ , м/с	$\beta$ , м/с
1,27/0,015	73	308	1,26/0,014	$0,47/8 \cdot 10^{-4}$	0,37/5,52	1,054/ 1,054
5,07/0,060			5,02/0,050	4,54/0,011	0,90/22,17	
– /0,598			– /0,498	– /0,106	– /21,29	
12,66/1,097	17	308	12,49/0,961	18,0/0,143	1,44/14,88	
			12,52/0,987	15,6/0,116	1,25/11,76	
			12,50/0,976	17,2/0,128	1,38/13,01	
	73	293	12,52/1,017	15,6/0,084	1,25/8,26	
		323	12,47/0,802	20,8/0,310	1,67/38,66	

## Заключение

Новизна проведенных исследований обусловлена тем, что в условиях равнодоступной поверхности вращающегося диска изучены зависимости удельных скоростей процессов цементационного осаждения селена и ртути в широких диапазонах величин влияющих параметров: температура и состав растворов, скорость вращения алюминиевого диска. Установлены режимы протекания и определены детали механизма изученных процессов.

В течение первых трех часов с начала процесса цементации на поверхности диска формируется осадок элементного селена, толщина и масса которого определяется параметрами процесса. Ионы ртути, взаимодействуя с селеном, образуют селенид ртути  $HgSe$  на поверхности диска. Концентрация ртути в растворе снижается, а скорость образования селенида ртути возрастает по мере накопления осадка селена. Образовавшийся селенид ртути может вступать в реакцию с металлическим алюминием, способствуя переводу в раствор катионов алюминия и анионов селеновой/селенистой кислоты; на поверхности диска остается элементная ртуть.

Процесс образования селенида ртути и его взаимодействие с алюминием подтверждается состоянием поверхности Al-диска:

- в бинарном растворе с низкой концентрацией ртути ( $\leq 3 \text{ мг/дм}^3$ ) при восстановлении селена практически не происходит коррозии диска
- поверхность остается гладкой, масса осадка невелика, поскольку слой восстановленного селена экранирует диск, предотвращая его коррозию при низкой исходной концентрации ртути;

- выявлен химическим анализом обратный переход селена из состава осадка в объем раствора.

В условиях стационарного процесса уравниваются скорости восстановления селена, образования селенида ртути, формирования элементной ртути и алюминиевой соли селеновой/селенистой кислоты.

Практическая значимость полученных результатов исследования заключается в том, что они могут служить исходными данными для оптимизации режима цементации. Информация по кинетике цементационного осаждения на алюминии позволяет разработать технологические рекомендации по извлечению селена из технологических растворов.

## Список литературы

1. Назаренко И.И., Ермаков А.Н. Аналитическая химия селена и теллура. М.: Наука, 1971. 252 с.

2. Бэгналл К. Химия селена, теллура и полония. М.: Атоимиздат, 1971. 216 с.
3. Чижииков Д.М., Счастливый В.П. Селен и селениды. М.: Наука, 1964. 320 с.
4. Котляр Ю.А., Меретуков М.А., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов: учебник. В 2-х кн. Кн. 1. М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и металл», 2005. 432 с.
5. Анодная и катодная медь / А.И. Вольхин, Е.И. Елисеев, В.П. Жуков, Б.Н. Смирнов. Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 2001. 432 с.
6. Лебедь А.Б., Набойченко С.С., Шунин В.А. Производство селена и теллура на ОАО «Уралэлектромедь»: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 112 с.
7. Сошникова Л.А., Купченко М.М. Переработка медьэлектролитных шламов. М.: Metallurgia, 1978. 199 с.
8. Мاستюгин С.А., Волкова Н.А., Ласточкина М.А. Шламы электролитического рафинирования меди и никеля. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 256 с.
9. Кудрявцев А.А. Химия и технология селена и теллура. М.: Metallurgia, 1968. 339 с.
10. Грейвер Т.Н., Зайцева И.Г., Косовер В.М. Селен и теллур. Новая технология получения и рафинирования. М.: Metallurgia, 1977. 296 с.
11. Букетов Е.А., Малышев В.П. Извлечение селена и теллура из медьэлектролитных шламов. Алма-Ата: Наука, 1969. 206 с.
12. Набойченко С.С., Мاستюгин С.А. Переработка медьэлектролитных шламов: эволюция технологии // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2012. № 5. С. 15–21.
13. Мельников Ю.Т., Кравцова Е.Д., Криницын Д.О. Гидрометаллургические технологии переработки шламов электрорафинирования меди и никеля // Цветные металлы. 2017. № 5. С. 44–49.
14. Хазиева Э.Б., Набойченко С.С., Болатбаев К.Н. Влияние лигносульфонатов на скорость цементации меди цинком // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 1. С. 11–14.
15. Свидетельство: SU 195112 A1 СССР, МПК C22B 43/00. Способ цементации ртути из сульфидно-щелочных растворов / П.П. Байбородов, А.Б. Ежков, А.М. Шуклин; заявитель Среднеазиатский научно-исследовательский и проектный институт цветных металлов. № 1064545/22-1; заявл. 22.03.1966; опубл. 05.06.1974.
16. Пат. 584562 СССР, МПК C22B 43/00. Способ извлечения ртути из растворов цементацией / Ю.А. Козьмин, Н.Г. Серба, И.И. Эннс, Л.Н. Куленова, А.Д. Коротин, Б.М. Алибаев, А.Д. Меняев, Б.П. Шоноу, Т.Ш. Баянжанов; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский горно-металлургический институт цветных металлов. № 2352577/02; заявл. 21.04.1976; опубл. 27.09.1999.
17. Плесков Ю.В., Филиновский В.Ю. Вращающийся дисковый электрод. М.: Наука, 1972. 344 с.
18. Вольдман Г.М., Зеликман А.Н. Теория гидрометаллургических процессов. М.: Интернет Инжиниринг, 2003. 464 с.

19. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 699 с.
20. Каковский И.А., Поташников Ю.М. Кинетика процессов растворения. М.: Metallurgy, 1975. 224 с.
21. Каковский И.А., Набойченко С.С. Термодинамика и кинетика гидрометаллургических процессов. Алма-Ата: Наука, 1986. 272 с.

#### References

1. Nazarenko I.I., Ermakov A.N. *Analiticheskaya khimiya seleni i telluri* [Analytical chemistry of selenium and tellurium]. Moscow: Nauka, 1971, 252 p. (In Russ.)
2. Bagnall K. *Khimiya seleni, telluri i poloniya* [Chemistry of selenium, tellurium and polonium]. Moscow: Atomizdat, 1971, 216 p. (In Russ.)
3. Chizhikov D.M., Schastliviy V.P. *Selen i selenidy* [Selenium and selenides]. Moscow: Nauka, 1964, 320 p. (In Russ.)
4. Kotlyar Yu.A., Meretukov M.A., Strizhko L.S. *Metallurgiya blagorodnykh metallov: uchebnik v 2 kn. Kn. 1.* [Metallurgy of precious metals: Textbook. In 2 books. Book 1]. Moscow: MISIS, Publishing house "Ore and Metal", 2005, 432 p. (In Russ.)
5. Volkhin A.I., Eliseev E.I., Zhukov V.P., Smirnov B.N. *Anodnaya i katodnaya med* [Anode and cathode copper]. Chelyabinsk: South Ural Book Publishing House, 2001, 432 p. (In Russ.)
6. Lebed A.B., Naboichenko S.S., Shunin V.A. *Proizvodstvo seleni i telluri na OAO Uralektromed: uchebnoe posobie* [Production of selenium and tellurium at OJSC Uralektromed: a textbook]. Yekaterinburg: Ural State University Press, 2015, 112 p. (In Russ.)
7. Soshnikova L.A., Kupchenko M.M. *Pererabotka medelektrolitnykh shlamov* [Processing of copper electrolyte sludge]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 199 p. (In Russ.)
8. Mastuygin S.A., Volkova N.A., Lastochkina M.A. *Shlami elektroliticheskogo rafinirovaniya medi i nikelya* [Sludge of electrolytic refining of copper and nickel]. Yekaterinburg: UrFU, 2013, 256 p. (In Russ.)
9. Kudryavtsev A.A. *Khimiya i tekhnologiya seleni i telluri* [Chemistry and technology of selenium and tellurium]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 339 p. (In Russ.)
10. Greiver T.N., Zaitseva I.G., Kosover V.M. *Selen i tellur. Novaya tekhnologiya polucheniya i rafinirovaniya* [Selenium and tellurium. New technology of production and refining]. Moscow: Metallurgy, 1977, 296 p. (In Russ.)
11. Buketov E.A., Malyshev V.P. *Izylechenie seleni i telluri iz medelektrolitnykh shlamov* [Extraction of selenium and tellurium from copper electrolyte sludge]. Alma-Ata: Nauka, 1969, 206 p. (In Russ.)
12. Naboichenko S.S., Mastuygin S.A. Processing of copper electrolyte sludge: evolution of the technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy], 2012, no. 5, pp. 15–21. (In Russ.)
13. Melnikov Yu.T., Kravtsova E.D., Krinitsyn D.O. Hydrometallurgical technologies for processing sludge of electrorefining of copper and nickel. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2017, no.5, pp. 44–49. (In Russ.)
14. Khazieva E.B., Naboichenko S.S., Bolatbayev K.N. Influence of lignosulfonates on the rate of copper precipitation with zinc. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy], 2015, no. 1, pp. 11–14. (In Russ.)
15. Bayborodov P.P., Ezhkov A.B., Shuklin A.M. *Sposob tsementatsii rtuti iz sulfidno-shchelochnykh rastvorov* [Method of mercury precipitation from sulfide-alkaline solutions]. Certificate: SU 195112 A1 USSR, IPC C22B 43/00, 1974.
16. Kozmin Yu.A., Serba N.G., Enns I.I., Kulenova L.N., Korotin A.D., Alibaev B.M., Menyayev A.D., Shonov B.P., Bayanzhanov T.Sh. *Sposob izylecheniya rtuti iz rastvorov tsementatsiy* [Method for extracting mercury from solutions by its precipitation]. Patent USSR, no. 584562, IPC C22B 43/00, 1999.
17. Pleskov Yu.V., Filinovsky V.Yu. *Vrashchayushchiysya diskoviy elektrod* [Rotating disk electrode]. Moscow: Nauka, 1972, 344 p. (In Russ.)
18. Voldman G.M., Zelikman A.N. *Teoriya gidrometallurgicheskikh protsessov* [Theory of hydrometallurgical processes]. Moscow: Internet Engineering, 2003. 464 p. (In Russ.)
19. Levich V.G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physico-chemical hydrodynamics]. Moscow: Fizmatgiz, 1959, 699 p. (In Russ.)
20. Kakovsky I.A., Potashnikov Yu.M. *Kinetika protsessov rastvoreniya* [Kinetics of dissolution processes]. Moscow: Metallurgy, 1975, 224 p. (In Russ.)
21. Kakovsky I.A., Naboichenko S.S. *Termodinamika i kinetika gidrometallurgicheskikh protsessov* [Thermodynamics and kinetics of hydrometallurgical processes]. Alma-Ata: Nauka, 1986. 272 p. (In Russ.)

Поступила 28.05.2021; принята к публикации 18.08.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 28/05/2021; revised 18/08/2021; published 27/09/2021

**Королев Алексей Анатольевич** – кандидат технических наук, главный инженер АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия.  
Email: A.Korolev@elem.ru

**Шунин Владимир Александрович** – заместитель начальника Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия.  
Email: V.Shunin@elem.ru



**Тимофеев Константин Леонидович** – кандидат технических наук, начальник технического отдела АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия.  
Email: K.Timofeev@elem.ru

**Мальцев Геннадий Иванович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия.  
Email: mgi@elem.ru

**Воинков Роман Сергеевич** – кандидат технических наук, начальник Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия.  
Email: R.Voinkov@elem.ru

**Alexey A. Korolev** – PhD (Eng.), Chief Engineer, JSC Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia.  
Email: A.Korolev@elem.ru

**Vladimir A. Shunin** – Deputy Head of the Research Center, JSC Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia.  
Email: V.Shunin@elem.ru

**Konstantin L. Timofeev** – PhD (Eng.), Head of the Technical Department, JSC Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia.  
Email: K.Timofeev@elem.ru

**Gennady I. Maltsev** – DrSc (Eng.), Senior Researcher, Chief Specialist of the Research Center, JSC Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia.  
E-mail: mgi@elem.ru

**Roman S. Voinkov** – PhD (Eng.), Head of the Research Center, JSC Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia.  
Email: R.Voinkov@elem.ru

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ОДНОРАЗОВЫХ И МНОГОРАЗОВЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЯЩИКОВ

Гутько Ю.И., Войтенко В.В.

Луганский государственный университет имени В. Даля, Луганск

**Аннотация. Постановка задачи.** В литейном производстве наблюдается устойчивая тенденция поиска новых и развития существующих стержневых технологий, характеризующихся повышенной безопасностью и экологичностью. Несмотря на то, что существует ряд перспективных стержневых технологий, таких как Cold-Box-Amin, Эпокси-SO<sub>2</sub> и Резол-CO<sub>2</sub>, жидкостекольная стержневая технология, относящаяся к наиболее безопасным и экологичным, имеет значительные резервы для дальнейшего развития – повышения сложности литейных стержней и производительности стержневого процесса. Конкурентоспособность жидкостекольного стержневого процесса может быть повышена путем экономии в стержневой смеси жидкого стекла и феррохромового шлака, что повышает выбиваемость литейных стержней из отливок, однако снижает их манипуляторную и максимальную прочность. Данная научно-техническая задача может быть решена путем выбора материала стержневого ящика с учетом его физико-технических свойств и подбора соответствующей рецептуры стержневой смеси. **Цель.** Исследование и выбор материалов для изготовления стержневых ящиков, используемых в жидкостекольной стержневой технологии. **Используемые методы.** Сравнительный анализ технологических свойств материалов, пригодных для изготовления стержневых ящиков, используемых в жидкостекольной стержневой технологии. **Новизна.** Обсуждаются результаты экспериментальных исследований применения различных материалов для изготовления стержневых ящиков, используемых в жидкостекольной стержневой технологии, и даются рекомендации по их применению. **Результаты.** Определены усилия, необходимые для извлечения жидкостекольного литейного стержня из стержневого ящика, для различных материалов стержневых ящиков. Измерен класс эксплуатационной шероховатости рабочей поверхности стержневого ящика из различных материалов в процессе эксплуатации и установлено его влияние на необходимую величину манипуляторной прочности литейного стержня. Определен средний по рабочей поверхности стержневого ящика износ для различных материалов стержневого ящика. **Практическая значимость.** Даются рекомендации по применению различных материалов для изготовления стержневых ящиков, используемых в жидкостекольной стержневой технологии, а также рекомендуется состав стержневой смеси в зависимости от материала стержневого ящика.

**Ключевые слова:** жидкостекольный литейный стержень, стержневая смесь, стержневой ящик, древесина, сталь, полиуретан, полиэтилен, силикон, каучук.

© Гутько Ю.И., Войтенко В.В., 2021

## Для цитирования

Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Перспективные материалы для изготовления одноразовых и многоразовых стержневых ящиков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 54–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-54-60>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# ADVANCED MATERIALS FOR MANUFACTURING DISPOSABLE AND REUSABLE CORE BOXES

Gutko Yu.I., Voytenko V.V.

Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk

**Abstract. Problem Statement.** The foundry shows a constant trend in a search for new core-making technologies and development of existing ones characterized by higher safety and environmental friendliness. There are the following advanced core manufacturing technologies: Cold-Box-Amin, Epoxy-SO<sub>2</sub>, and Resol-CO<sub>2</sub>. Nevertheless, a sodium silicate core-making process, attributed to the safest and the most eco-friendly technologies, has significant reserves for its advanced development, it is possible to increase the complexity of mold cores and performance of the core-making process. Competitiveness of the sodium silicate core-making process can be enhanced by saving sodium silicate and ferrochromium slag in a core mixture to increase the breakdown property of mold cores from castings, but this reduces their operational and maximum strength. This research and technical issue can be solved by choosing the core box material, considering its physical and mechanical properties, and selecting the appropriate core mixture composition. **Objective.** The research is aimed at studying and choosing materials for manufacturing core boxes used in the sodium silicate core-making technology. **Methods Applied.** The comparative analysis of the mechanical properties of the core box materials in the sodium silicate core-making technology. **Originality.** The paper describes the experimental results of the use of various core box materials in the sodium silicate core-making technology and provides the recommendations on the use of these materials. **Results.** The authors determined force of extraction for a sodium silicate core from a core box for various core box materials. They measured an operational surface roughness class of the effective area of the core boxes made of various materials and determined its effect on the required value of the operational structural robustness of a mold core. An average wear of a core box effective area is determined for various core box materials. **Practical Relevance.** The paper contains the recommendations on the use of various core box materials for the sodium silicate core-making technology and a core mixture composition depending on a core box material.

**Keywords:** sodium silicate mold core, core mixture, core box, wood, steel, polyurethane, polyethylene, silicone, rubber.

## For citation

Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Advanced Materials for Manufacturing Disposable and Reusable Core Boxes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 54–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-54-60>

## Введение

Широкое распространение в литейном производстве получили песчаные литейные стержни, основным компонентом которых является кварцевый песок [1]. В качестве связующего вещества могут быть использованы как синтетические смолы, так и растворы силикатов, отверждаемые жидкими либо газообразными катализаторами (отвердителями) [2]. Применение различных добавок к стержневой смеси способствует повышению манипуляторной прочности песчаного литейного стержня, а также улучшению выбиваемости литейных стержней из отливок, в том числе благодаря снижению пригара [3]. В качестве добавок к жидкостекольной стержневой смеси могут выступать как органические, так и неорганические соединения, которые в процессе термического разложения приводят к образованию твердых и газообразных продуктов разложения, которые способны оказывать влияние как на саму отливку, так и на условия труда в литейном цехе [4]. Повышение требований к экологичности литейного производства дает новый толчок к развитию стержневых технологий,

среди которых одной из наиболее экологичных и безопасных является жидкостекольная стержневая технология. Высокая доступность и низкая стоимость жидкого стекла определяется сравнительно простой технологией его получения, которая может быть организована непосредственно на стержневом участке литейного цеха [5]. Как само жидкое стекло, так и продукты разложения песчаного литейного стержня на его основе в процессе изготовления отливки не относятся к токсичным веществам, что делает жидкостекольную стержневую технологию перспективной и имеющей резервы для своего дальнейшего развития [6].

Одним из недостатков жидкостекольной стержневой технологии является сложность получения жидкостекольных литейных стержней высокой сложности и хорошей выбиваемости из отливок [7]. Повышение процентного содержания жидкого стекла в стержневой смеси приводит к увеличению манипуляторной и максимальной прочности литейного стержня, что подтверждается при испытаниях литейных стержней на прочность при растяжении, сжатии и из-

гибе, однако при этом ухудшается выбиваемость литейных стержней из отливок [8]. Использование рецептур жидкостекольных стержневых смесей с содержанием феррохромового либо металлургического шлака способно повысить манипуляторную и максимальную прочность жидкостекольных литейных стержней и при этом улучшить их выбиваемость из отливок [9].

Компромисс между приемлемой манипуляторной прочностью, позволяющей изготавливать литейные стержни сложной формы, и приемлемой выбиваемостью из отливок жидкостекольных литейных стержней может быть найден путем подбора материалов для изготовления стержневых ящиков с достаточной упругостью, высокой износостойкостью и малой адгезионной способностью к жидкостекольной стержневой смеси [10]. Также требуется одновременно с анализом эксплуатационных свойств материала стержневого ящика выполнить подбор рецептуры жидкостекольной стержневой смеси таким образом, чтобы получить наилучшее сочетание эксплуатационных свойств литейного стержня. Поэтому проведение исследований по подбору по физико-техническим свойствам материалов для изготовления стержневых ящиков, используемых в жидкостекольной стержневой технологии, а также соответствующих рецептур жидкостекольной стержневой смеси является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является исследование и выбор материалов для изготовления стержневых ящиков, используемых в жидкостекольной стержневой технологии.

### Методика проведения исследований

Анализ физико-технических свойств применяемых материалов и технологических свойств стержневых ящиков и их влияние на физико-технические свойства жидкостекольных литейных стержней выполнялся для материалов, из которых стержневые ящики получены механической обработкой, и для материалов, из которых стержневые ящики получены путем заполнения формы раствором либо расплавом. Определялась адгезия поверхности стержневого ящика к поверхности жидкостекольного литейного стержня после набора им манипуляторной прочности при однократном и многократном использовании стержневого ящика. Для этого при помощи динамометра измерялась сила, приходящаяся на единицу контактирующей площади стержневого ящика с литейным стержнем при его извлечении из стержневого ящика. Дополни-

тельно при помощи оптического микроскопа со 100-, 200-, 500- и 1000-кратным увеличением определялась шероховатость рабочей поверхности стержневого ящика и ее изменение при многократном применении стержневого ящика для различных материалов, из которых он был изготовлен. Таким образом определялись износостойкость рабочих поверхностей стержневого ящика и необходимое усилие для извлечения из него жидкостекольного литейного стержня, позволяющие оценить необходимую величину манипуляторной прочности литейного стержня, обеспечивающую его извлечение из стержневого ящика без повреждений.

Контроль манипуляторной и максимальной прочности жидкостекольных литейных стержней осуществлялся при помощи испытаний литейных стержней на растяжение, сжатие и изгиб, проводимых на машине для испытаний на прочность. Упругость материала стержневого ящика определялась по результатам косвенных измерений: сначала путем прямых измерений определялась величина деформации исследуемого материала от приложенной силы, измеряемой при помощи динамометра, а затем выполнялся расчет коэффициента упругости материала. Измерение времени полимеризации (затвердевания) жидких в исходном состоянии материалов, таких как силикон, полиуретан, каучук, выполнялось в двух случаях: при нахождении заполненной формы при нормальных условиях и при нахождении заполненной формы в вакууме. Таким образом определялась возможность изготовления стержневого ящика вакуумированием формы и возможность ускорения процесса изготовления стержневого ящика. Стержневые ящики из древесины, стали и полиэтилена изготавливались путем механической обработки материала с использованием токарного, сверлильного и фрезерного станков, а также с использованием разверток для повышения класса шероховатости поверхностей.

### Полученные результаты и их обсуждение

Сравнительный анализ физико-технических характеристик различных материалов, используемых для изготовления стержневых ящиков в жидкостекольной стержневой технологии, выполнялся для жидкостекольной стержневой смеси следующего состава: кварцевый песок – 75% ; металлургический шлак – 5% ; натриевое жидкое стекло плотностью 1,442 кг/л – 20%. Стержневая смесь с повышенным содержанием жидкого стекла была выбрана с целью получения максимальных значений усилий, необходимых для



извлечения жидкостекольных литейных стержней из стержневых ящиков, изготовленных из различных материалов. Результаты измерения усилия, необходимого для извлечения жидкостекольного литейного стержня после набора им необходимой манипуляторной прочности из стержневых ящиков, изготавливаемых из различных материалов, приведены в **табл. 1**.

Материалы, из которых были изготовлены исследованные стержневые ящики (см. **табл. 1**), приведены в порядке возрастания усилия, необходимого для извлечения литейного стержня из стержневого ящика. Из приведенных данных следует, что наименьшим усилием извлечения характеризуются стержневые ящики, изготовленные путем заполнения формы жидким силиконом, например марки SKR-781, и полиуретановой монтажной пеной. При изготовлении стержневых ящиков с помощью механической обработки минимальными усилиями извлечения жидкостекольных литейных стержней из них характеризуются такие материалы, как стеклотекстолит и полиэтилен.

В **табл. 2** приведены результаты исследования изменения класса шероховатости рабочей поверхности стержневых ящиков, изготовленных из различных материалов, данные по исходному классу шероховатости, определенному технологией изготовления и свойствами материала, а также по эксплуатационному классу шероховатости после ста циклов заполнения и извлечения из стержневого ящика жидкостекольного литейного стержня. Эксплуатационная шероховатость рабочих поверхностей стержневого ящика оказывает заметное влияние на изменение условий извлечения литейных стержней из стержневых ящиков, изменяясь в большую сторону от полутора до трех раз – это необходимое условие для извлечения литейного стержня из стержневого ящика. Возможность увеличения усилия извлечения до трех раз в процессе экс-

плуатации стержневого ящика должна учитываться на стадии выбора величины необходимой манипуляторной прочности жидкостекольного литейного стержня, что приводит к увеличению процентного содержания в жидкостекольной стержневой смеси жидкого стекла и металлургического либо феррохромового шлака.

Исследования соотношения между усилием, необходимым для извлечения жидкостекольного литейного стержня из стержневого ящика, и его манипуляторной прочностью показали, что использование силиконового компаунда в качестве материала для изготовления стержневого ящика позволяет применять стержневые смеси с содержанием жидкого стекла в количестве от 4,5% и манипуляторной прочностью литейного стержня от 50 кПа, а использование полиуретановой монтажной пены потребует увеличения манипуляторной прочности литейного стержня до 150 кПа и увеличения необходимого процентного содержания жидкого стекла от 6%. Использование полиэтилена для изготовления стержневого ящика потребует увеличения манипуляторной прочности жидкостекольного литейного стержня до 500 кПа и соответствующего процентного содержания жидкого стекла в стержневой смеси от 12 до 16% при содержании феррохромового либо металлургического шлака в количестве 6–8%. Использование других материалов (см. **табл. 2**) потребует дальнейшего повышения манипуляторной прочности литейных стержней и увеличения в них доли жидкого стекла и феррохромового шлака.

Таким образом, силиконовый компаунд является перспективным материалом для изготовления стержневых ящиков, позволяющим получить качественные жидкостекольные литейные стержни любой сложности с минимальными требованиями по величине манипуляторной прочности и минимально необходимым усилием извлечения литейного стержня из стержневого ящика.

Таблица 1. Усилия, необходимые для извлечения жидкостекольного литейного стержня из стержневого ящика, для различных материалов стержневых ящиков

Table 1. Force of extraction for a sodium silicate mold core from a core box for various core box materials

Материал стержневого ящика	Силиконовый компаунд Silikon SKR-781	Полиуретановая монтажная пена	Стекло-текстолит	Древесина (дуб)	Полиэтилен	Акриловый герметик	Каучук (резина)	Сталь Ст3кп	Полиуретан	Фанера
Усилие извлечения литейного стержня из стержневого ящика, кПа	1,1	2,2	6,5	19,6	27,2	28,3	39,2	54,4	137,8	174,0

Таблица 2. Изменение класса шероховатости рабочей поверхности стержневых ящиков, изготовленных из различных материалов, в процессе эксплуатации

Table 2. Change in the effective area roughness class of core boxes made of various materials during their operation

Материал стержневого ящика	Исходная шероховатость, класс	Эксплуатационная шероховатость, класс	Абсолютное изменение шероховатости, класс	Относительное изменение класса шероховатости, %
Силиконовый компаунд Silikon SKR-781	8	7	1	12,5
Сталь СтЗкп	8	7	1	12,5
Каучук (резина)	5	4	1	20,0
Стеклотекстолит	6	4	2	33,3
Фанера	2	1	1	50,0
Полиуретан	3	1	2	66,7
Полиэтилен	8	2	6	75,0
Древесина (дуб)	4	1	3	75,0
Акриловый герметик	4	1	3	75,0
Полиуретановая монтажная пена	8	1	7	87,5

В табл. 3 приведены результаты исследования среднего по рабочей поверхности стержневого ящика износа за сто циклов заливок и извлечений жидкостекольной стержневой смеси из стержневого ящика, изготовленного из различных материалов. Материалы, из которых был изготовлен стержневой ящик, расположены в порядке увеличения износа при эксплуатации. Снова силиконовый компаунд марки SKR-781, используемый для изготовления форм белого цвета, имеет наименьший износ благодаря высокой пластичности и упругости. Таким образом, силиконовый компаунд обладает высокой износостойкостью по сравнению с более твердыми и менее упругими материалами. Данные по стеклотекстолиту лучше, чем по стали СтЗкп, так как использован стеклотекстолит высокой плотности и твердости. Для других сталей более высокого качества износ будет закономерно меньший, чем износ стеклотекстолита обычного качества, износостойкость которого зависит от применяемой смолы и отвердителя.

Приведенные авторами результаты исследований позволяют сделать обоснованный выбор материала для изготовления стержневого ящика. Следует отметить, что силиконовый компаунд может с успехом использоваться для изготовления стержневых ящиков любой сложности, в том числе для изготовления литейных стержней по выплавляемым восковым моделям сложной формы. Силикон выдерживает нагрев до 150–450°C в зависимости от добавок и наполнителей, поэтому нагревом стержневого ящика можно выплавить восковую модель высокой сложности. Таким образом могут быть получены литейные стержни особой сложности, получение которых другими

способами трудно осуществить. Стержневой ящик из силикона потребует каркаса, например металлического (авторами использован алюминиевый каркас), который бы обеспечивал не только внешние границы при заливке силикона в процессе изготовления стержневого ящика, но и последующую объемную жесткость силиконового стержневого ящика. Объемная жесткость силикона может быть увеличена путем добавления в него специального загустителя, а также введения в его состав различных наполнителей в виде порошков, гранул, волокон либо их комбинации.

Таблица 3. Средний по рабочей поверхности стержневого ящика износ за сто заливок и извлечений жидкостекольной стержневой смеси

Table 3. An average wear of a core box effective area for 100 pouring and extraction cycles of the sodium silicate core mixture

Материал стержневого ящика	Средний по поверхности стержневого ящика износ за сто заливок и извлечений, мкм
Силиконовый компаунд Silikon SKR-781	2,6
Стеклотекстолит	3,6
Сталь СтЗкп	7,6
Полиэтилен	26,3
Фанера	50,9
Полиуретан	100,2
Каучук (резина)	111,1
Полиуретановая монтажная пена	132,0
Акриловый герметик	180,7
Древесина (дуб)	263,3

Поскольку в ряде случаев удобно заполнять форму при изготовлении силиконового стержневого ящика путем создания внешнего избыточного давления либо путем вакуумирования формы, авторами были исследованы процессы высыхания силикона и полиуретановой монтажной пены, удобной для изготовления стержневых ящиков для мелкосерийного и разового использования. Установлено, что вакуумирование способствует качественному заполнению формы, однако длительное нахождение формы под вакуумом замедляет процесс полимеризации силикона в ней. Поэтому после короткой выдержки – около 5 мин – под вакуумом форма должна быть снова помещена в воздушную атмосферу с температурой в диапазоне 50–60°C, при которой время полимеризации силикона составляет от одних до пяти суток в зависимости от конструкции стержневого ящика, наличия загустителей и наполнителей, а также толщины слоя силикона.

Применение полиуретановой монтажной пены для изготовления стержневых ящиков наиболее удобно, если форма для изготовления стержневого ящика представляет собой открытый с одной стороны ящик, что позволяет полиуретановой монтажной пене свободно расширяться и быстро – в течение 30–60 мин – полимеризоваться. Регулировать плотность полиуретановой монтажной пены и условия для заполнения формы возможно путем создания внешнего давления, препятствующего интенсивному увеличению заполненного полиуретановой монтажной пеной объема. Создание разряжения при заполнении полиуретановой монтажной пеной формы может привести к дегазации пены и не будет способствовать ее полимеризации. Поэтому в данном случае вакуумирование формы для лучшего заполнения неэффективно.

### Заключение

Проведен сравнительный анализ технологических свойств различных материалов, пригодных для изготовления стержневых ящиков, используемых в жидкостекольной стержневой технологии. Исследованы такие параметры материалов, как износостойкость при контакте с жидкостекольной стержневой смесью, упругость, время полимеризации материала стержневого ящика для изначально жидких материалов, адгезия поверхности используемого материала к жидкостекольной стержневой смеси, гигроскопичность, газопроницаемость и термостойкость. Результаты экспериментальных исследований применения различных материалов для изготовления стерж-

невых ящиков для жидкостекольной стержневой технологии позволили сформулировать рекомендации по возможному их применению и по оптимальному содержанию в стержневой смеси жидкого стекла и феррохромового шлака.

Проведенные исследования показали, что перспективным материалом для изготовления стержневых ящиков является силикон, применение которого снижает манипуляторную прочность жидкостекольных литейных стержней за счет малого усилия, необходимого для извлечения литейного стержня из стержневого ящика, а также дает возможность повысить сложность формы стержневого ящика и его износостойкость. Применение силикона в качестве материала для изготовления стержневых ящиков позволяет значительно повысить сложность формы литейных стержней за счет применения выплавленных моделей из воска, парафина и других легкоплавких материалов. Недостатком силикона является длительное время полимеризации, что следует учитывать при единичном и мелкосерийном литейном производстве, а также его высокая стоимость, которая может быть снижена за счет применения различных наполнителей.

Применение полиуретановой монтажной пены удобно при единичном и мелкосерийном производстве отливок, так как позволяет сравнительно быстро изготавливать стержневые ящики достаточно высокой сложности, позволяющие получать жидкостекольные литейные стержни с малыми значениями манипуляторной прочности и, следовательно, экономить жидкое стекло и феррохромовый шлак. Такие стержневые ящики имеют более высокую гигроскопичность, что улучшает условия для набора манипуляторной прочности жидкостекольным литейным стержнем в среде углекислого газа и способствует лучшей потере влаги по сравнению со стержневым ящиком, изготовленным из силикона.

### Список литературы

1. Sabine Anzualda. Metal Producing Process: A Complete Guidelines to Manufacture: Advanced Metal Casting Ppt. 2021. 154 с.
2. Alan Tomsett. Light Metals 2020 (The Minerals, Metals, & Materials Series). New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020. 1395 с. ISBN: 978-3030364076.
3. Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7<sup>th</sup> Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2020. 816 с. ISBN: 978-1119722014.
4. Holtzer M., Kmita A. Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology Sustainable Development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London:

- Springer, 2020. 378 c. ISBN: 978-3-030-53210-9.
5. Manufacturing Technology – KL / S. Ramachandran, R. Devaraj, S. Ramesh, N. Balaji. Chennai, India: Airwalk Publications, 2017. 880 c. ISBN: 978-8192403137.
  6. Burns T.A. The Foseco Foundryman's Handbook: Facts, Figures, and Formulae. 9<sup>th</sup> Ed. Pergamon, 2017. 446 c. ISBN: 978-0080325491.
  7. Jain P.L. Principles of Foundry Technology. 5<sup>th</sup> Ed. New York City: Tata McGraw Hill Publishing Co., Ltd.; 2014. 479 c. ISBN: 978-0-07-015129-1.
  8. Srinivasan M. Science and Technology of Casting Processes. London: IntechOpen Limited, 2012. 350 c. ISBN: 978-953-51-6237-7 (eBook). ISBN: 978-953-51-0774-3 (Hardcover Book). DOI: 10.5772/3128. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/3128>.
  9. Wang W., Conley H.W., Stoll J.G. Rapid Tooling Guidelines for Sand Casting. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2010. 164 c. ISBN: 978-1-4419-5731-3 (eBook). ISBN: 978-1-4419-5730-6 (Hardcover Book).
  10. Brown J.R. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. 11<sup>th</sup> Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000. 384 c. ISBN: 978-0-0805-0679-1 (eBook). ISBN: 978-0-0809-7397-5 (Softcover Book). ISBN: 978-0-7506-4284-2 (Hardcover Book).
- References**
1. Sabine Anzualda. Metal producing process: a complete guidelines to manufacture: advanced metal casting ppt. 2021, 154 p.
  2. Alan Tomsett. Light metals 2020 (The Minerals, Metals, & Materials Series). New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020, 1395 p. ISBN: 978-3030364076.
  3. Mikell P. Groover. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. 7<sup>th</sup> ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2020, 816 p. ISBN: 978-1119722014.
  4. Holtzer M., Kmita A. Mold and core sands in metalcasting: chemistry and ecology sustainable development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020, 378 p. ISBN: 978-3-030-53210-9.
  5. Ramachandran S., Devaraj R., Ramesh S., Balaji N. Manufacturing technology – KL. Chennai, India: Airwalk Publications, 2017, 880 p. ISBN: 978-8192403137.
  6. Burns T.A. The Foseco foundryman's handbook: facts, figures, and formulae. 9<sup>th</sup> ed. Pergamon, 2017, 446 p. ISBN: 978-0080325491.
  7. Jain P.L. Principles of foundry technology: fifth edition. New York City: Tata McGraw Hill Publishing Co., Ltd., 2014, 479 p. ISBN 978-0-07-015129-1.
  8. Srinivasan M. Science and technology of casting processes. London: IntechOpen Limited, 2012, 350 p. ISBN: 978-953-51-6237-7 (eBook). ISBN: 978-953-51-0774-3 (Hardcover Book). DOI: 10.5772/3128. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/3128>.
  9. Wang W., Conley H.W., Stoll J.G. Rapid tooling guidelines for sand casting. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2010, 164 p. ISBN: 978-1-4419-5731-3 (eBook). ISBN: 978-1-4419-5730-6 (Hardcover Book).
  10. Brown J.R. Foseco ferrous foundryman's handbook: 11th edition. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000, 384 p. ISBN 978-0-0805-0679-1 (eBook). ISBN 978-0-0809-7397-5 (Paperback). ISBN 978-0-7506-4284-2 (Hardcover).

Поступила 08.05.2021; принята к публикации 31.05.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 08/05/2021; revised 31/05/2021; published 27/09/2021

**Гутько Юрий Иванович** – доктор технических наук, профессор, первый проректор, Луганский государственный университет имени В. Даля, Луганск.  
Email: [lguni.lit@yandex.ru](mailto:lguni.lit@yandex.ru)

**Войтенко Валерий Владимирович** – аспирант кафедры промышленного и художественного литья, Луганский государственный университет имени В. Даля, Луганск.  
Email: [valery.voytenko@outlook.com](mailto:valery.voytenko@outlook.com)

**Yury I. Gutko** – DrSc (Eng.), Professor, First Vice-Rector, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk.  
Email: [lguni.lit@yandex.ru](mailto:lguni.lit@yandex.ru)

**Valery V. Voytenko** – postgraduate student of the Industrial and Art Castings Department, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk.  
Email: [valery.voytenko@outlook.com](mailto:valery.voytenko@outlook.com)



## ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.762

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-61-67



### РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ СТРУЖКИ Д-16 С ДОБАВЛЕНИЕМ ПОРОШКА НИКЕЛЯ

Слабкий Д.В.<sup>1</sup>, Сергеенко С.Н.<sup>1</sup>, Попов Ю.В.<sup>2</sup>, Салиев А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

<sup>2</sup>Институт наук о Земле Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия

**Аннотация.** В работе исследованы закономерности измельчения, проведён рентгеноструктурный и термический анализ порошковых материалов на основе механохимически активированной шихты стружки Д-16 с добавлением порошка никеля. Оптимизированы параметры размола алюминиевой стружки Д-16 при утилизации отходов токарного производства. Построены дифференциальные кривые распределения частиц порошка по размерам после механохимической активации в среде насыщенного водного раствора борной кислоты и ручной обработки в ступке. Фазовый анализ материала шихты показал отсутствие оксидов алюминия за счёт плакирования порошковых частиц оксидом бора в процессе размола и формирования сложных оксидов  $(Al_2O_3)_{1.33}$  в процессе кратковременного нагрева под горячую штамповку. Увеличение полуширины дифракционного профиля горячедеформированного порошкового материала, связанное с повышением дефектности структуры в процессе деформации, свидетельствует о его «горячем» наклёпе. Исследования, проведённые в воздушной и гелиевой атмосфере методами синхронного термического анализа (STA), выявили протекание экзотермической реакции и возможное формирование интерметаллидов в материале активированного стружкового порошка. Рентгеноспектральный микроанализ горячедеформированного порошкового материала, полученного на основе механохимически активированной шихты, выявил наличие трех основных областей: светлой, серой, тёмной. В светлой области показана возможность формирования интерметаллидов  $(Al_3Ni_2)_{0.4}$  с небольшой примесью меди и железа, а также отсутствие кислорода. Серая область представляет собой неокисленный алюминий с незначительными примесями меди. Таким образом, показано, что агломераты состоят из неокисленных частиц алюминия и интерметаллидной сетки между ними. Тёмная область представляет собой окисленные частицы алюминия и никеля с примесями магния, железа и меди.

**Ключевые слова:** стружка сплава Д16, механохимическая активация, интерметаллиды, горячедеформированный материал.

© Слабкий Д.В., Сергеенко С.Н., Попов Ю.В., Салиев А.Н., 2021

#### Для цитирования

Рентгеноструктурный анализ порошковых материалов на основе механохимически активированной стружки Д-16 с добавлением порошка никеля / Слабкий Д.В., Сергеенко С.Н., Попов Ю.В., Салиев А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 61–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-61-67>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF POWDER MATERIALS BASED ON MECHANOCHEMICALLY ACTIVATED CHIPS D-16 AND ADDED NICKEL POWDER

Slabkiy D.V.<sup>1</sup>, Sergeenko S.N.<sup>1</sup>, Popov Yu.V.<sup>2</sup>, Saliev A.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

<sup>2</sup>Institute for Earth Sciences Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

**Abstract.** Regularities of grinding were studied in the paper. The authors carried out an X-ray diffraction and thermal analysis of powder materials based on a mechanochemically activated charge of D-16 chips and added nickel powder. The parameters of grinding D-16 aluminum chips have been optimized for recycling lathe waste. Differential curves of the powder particle size distribution were built after the mechanochemical activation in a saturated aqueous solution of boric acid and manual processing in a mortar. A phase analysis of the charge material showed the absence of aluminum oxides due to the cladding of powder particles with boron oxide during grinding and the formation of complex oxides  $(Al_2O_3)_{1.33}$  during a short-time heating for hot stamping. An increase in the half-width of the diffraction profile of a hot-deformed powder material, associated with an increase in the number of the structural defects during deformation, indicates its “hot” work-hardening. The studies carried out in air and helium atmosphere by the simultaneous thermal analysis (STA) methods revealed an exothermic reaction and the possible formation of intermetallic compounds in the activated chip powder. An X-ray spectral microanalysis of a hot-deformed powder material produced by using the mechanochemically activated charge revealed three main areas: light, gray, and dark ones. The light area shows the possibility of the formation of intermetallic compounds  $(Al_3Ni_2)_{0.4}$  with a small admixture of copper and iron, as well as the absence of oxygen. The gray area is unoxidized aluminum with minor copper impurities. Thus, it was shown that the agglomerates consist of unoxidized aluminum particles and an intermetallic network between them. The dark area represents oxidized particles of aluminum and nickel and impurities of magnesium, iron and copper.

**Keywords:** D16 alloy chip, mechanochemical activation, intermetallic compounds, hot-deformed material.

## For citation

Slabkiy D.V., Sergeenko S.N., Popov Y.V., Saliev A.N. X-Ray Diffraction Analysis of Powder Materials Based on Mechanochemically Activated Chips D-16 and Added Nickel Powder. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 61–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-61-67>

## Введение

Одной из основных задач, стоящей перед металлообрабатывающим производством, является утилизация стружковых отходов. Применение стружковых отходов снижает затраты на исходные материалы при получении активированного стружкового порошка (АСП) и горячедеформированных порошковых материалов (ГДПМ) [1-5].

Для упрочнения материалов используют соединения интерметаллидов, получаемые введением никеля (6% масс). Для устранения окисления и газонасыщения в процессе механохимической активации (МХА) стружки алюминиевого сплава Д-16 используется борная кислота [6, 7].

## Материалы и методика проведения исследований

В качестве исходных материалов использовались стружка алюминиевого сплава Д-16, порошок никеля (ПНК-УТ1) и алюминиевый порошок (ПА-4). Анализ зависимостей, полученных при изучении влияния содержания насы-

щенного водного раствора борной кислоты (НВРБК) на процессы, протекающие при МХА в жидких средах, показал, что введение НВРБК в количестве 20% от массы шихты способствует процессу измельчения стружки [8]. Выход АСП, состоящего из мелкодисперсной шихты и трудноразрушимых агломератов, близок к максимальному (79% масс). Дальнейшее повышение содержания НВРБК до 40% от массы шихты приводит к снижению содержания фракции -63 мкм в АСП и образованию активной шихты, агломерирующей в процессе ручной обработки. При этом формирование активной шихты обеспечивает повышенные значения твердости и прочности на срез при пониженной относительной плотности ГДПМ.

Технология получения материала включала: предварительную резку стружки и магнитную сепарацию, МХА в планетарной мельнице при частоте вращения ротора 300 мин<sup>-1</sup> в течение 4 ч. Шихта на основе стружки Д-16 содержит 6% от массы порошка никеля. Для защиты от окисле-

ния порошковых частиц и интенсификации процесса измельчения вводили насыщенный водный раствор борной кислоты (40% от массы шихты) [8]. После МХА выделяли активированный стружковый порошок (фракция -630 мкм) с последующим его смешиванием с ПА-4 (50% масс) в состоянии поставки при частоте вращения ротора 150 мин<sup>-1</sup> в течение 20 минут. Формование заготовок производилось путем холодного прессования (450 МПа) с последующим нагревом в воздушной атмосфере (550°C, 5 мин) и горячей штамповкой с приведенной работой уплотнения 140 МДж/м<sup>3</sup>.

### Результаты экспериментальных исследований

Построены дифференциальные кривые  $F(x)$  распределения частиц порошка по размерам  $x$  для механохимически активированной шихты, полученной при оптимальных параметрах размола (1), и последующей ручной обработки (2).

$$F(x) = 2,1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,88 \cdot x^{(0,88-1)} \exp(-2,1 \cdot 10^{-2} \cdot x^{0,88}), \quad (1)$$

$$F(x) = 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 2,17 \cdot x^{(2,17-1)} \exp(-1,1 \cdot 10^{-5} \cdot x^{2,17}), \quad (2)$$

Фазовый анализ материала АСП, выполненный на дифрактометре ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific (ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ)), полученный механохимической активацией стружки Д-16 с порошком никеля, показал отсутствие оксидов алюминия за счёт плакирования порошковых частиц оксидом бора в процессе МХА (рис. 1, а). На основе анализа дифрактограммы материала АСП высказана гипотеза о формировании соединения  $(Al_3Ni_2)_{0,4}$  в процессе МХА. Для шихты, полученной сме-

шиванием порошка алюминия в состоянии поставки (50% масс) с механохимически активированным порошком, не выявлены пики никеля из-за снижения его количества. В процессе кратковременного нагрева под ГШ (рис. 1, б) установлено формирование сложных оксидов  $(Al_2O_3)_{1,33}$ .

Механохимическая активация порошковой шихты приводит к уширению линии (111) и (222) алюминия (табл. 1) вследствие повышения микронапряжений и уменьшения размеров блоков мозаики. Введение порошка алюминия способствует снижению дефектности структуры. Полуширина дифракционного профиля для ГДПМ больше, чем для порошковой шихты, что свидетельствует о повышении дефектности структуры в процессе деформации порошкового материала. Это свидетельствует о «горячем» наклёпе порошкового материала Al-Ni [9, 10].

Исследования, проведённые методами синхронного термического анализа (STA) на приборе NETZSCH STA 449 C Jupiter в воздушной и гелиевой атмосфере, подтверждают возможное формирование интерметаллидов материала АСП (рис. 2, а). Процесс нагрева АСП в воздушной атмосфере сопровождается несколькими термическими эффектами: а) удаление воды (40–260°C); б) экзоэффект (500–560°C); в) эндоэффект (560–580°C); г) экзоэффект (580°C) – процесс не завершен. Нагрев АСП в среде гелия (рис. 2, б) сопровождается следующими термическими эффектами: а) удаление воды (40–260°C); б) экзоэффект (550–600°C). Нагрев ГДПМ в воздушной атмосфере (рис. 2, в): а) удаление воды (40–260 °C); б) экзоэффект при (425–590°C); в) эндоэффект при (590–640°C).

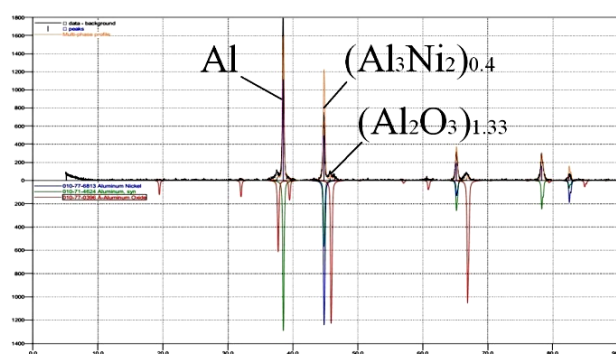
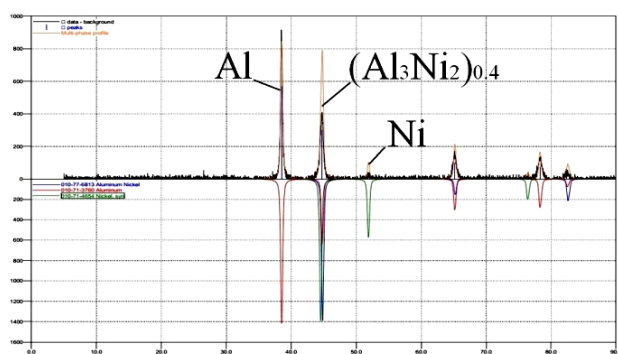


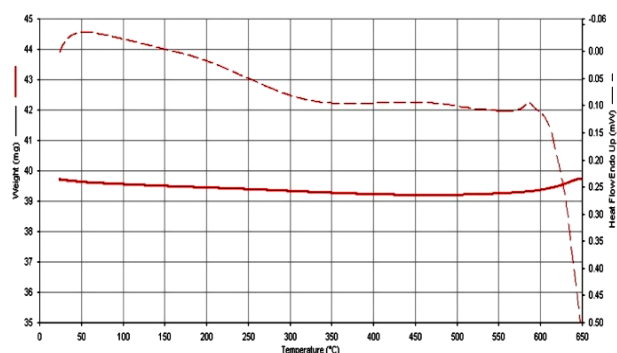
Рис. 1. Уширение пиков материала после МХА (а) и горячего доуплотнения (б)

Fig. 1. The broadening of the material peaks after mechanochemical activation (a) and hot additional compaction (б)

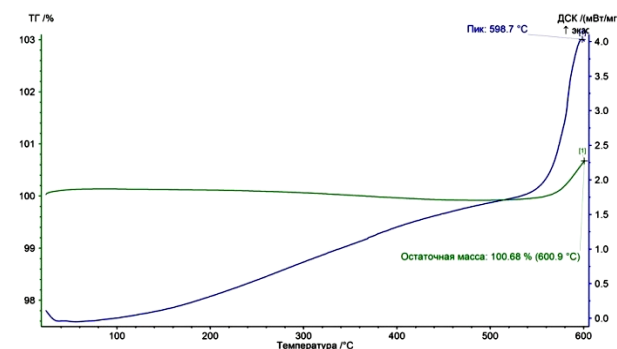
Таблица 1. Расчетные значения полуширины дифракционного профиля линии Al для ПА-4 в состоянии поставки, АСП, АСППА после смешивания и ГДПМ на ее основе

Table 1. Calculated values of the half-width of the diffraction profile of the Al line for aluminum powder of PA-4 grade as supplied, sintered aluminum powder, sintered aluminum powder + aluminum powder after mixing and hot worked powder material on its basis

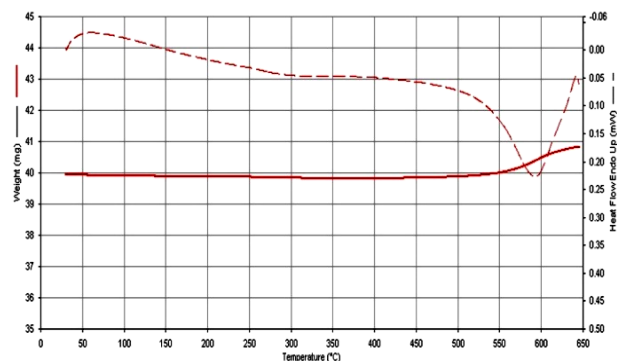
Индексы hkl	2Θ, град				Полуширина дифракционного профиля, град			
	ПА-4	АСП	АСППА	ГДПМ	ПА-4	АСП	АСППА	ГДПМ
111	38,4398	38,4564	38,4694	38,4664	0,0725	0,3168	0,1009	0,1793
222	82,4000	82,4123	82,4363	82,4659	0,1064	0,6181	0,1972	0,3567



а



б

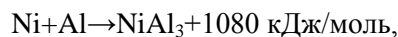


в

Рис. 2. Результаты STA образца на основе АСП в атмосфере воздуха (а) и гелия (б) и ГДПМ в воздушной атмосфере (в)

Fig. 2. STA of a sample based on sintered aluminum powder in air (a) and helium (б) and hot worked powder material in air (в)

В зоне контакта частиц никеля с алюминиевой матрицей в материале АСП возможно протекание экзотермической реакции [11]. Высказана гипотеза, что причиной возникновения эндоэффекта может являться контактное плавление образца. В системах, где возможно образование химических соединений, жидкая фаза в контакте может появиться даже при более низких температурах относительно температуры плавления легкоплавкого компонента исследуемой системы. В подобных системах образование химических соединений в месте контакта образцов сопровождается значительным выделением тепла, так что температура контакта образцов будет существенно выше температуры термостата.



Рентгеноспектральный микроанализ, проведенный с использованием системы энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT на базе растрового электронного микроскопа Tescan VEGA II LMU, показал следующее: материал АСП характеризуется не только содержанием алюминия и никеля, но и кислорода (рис. 3, а). В локальных зонах (рис. 3, б, точки 1, 2) структуры ГДПМ на основе смеси АСП с ПА-4 выявлено пониженное содержание кислорода.

Рентгеноспектральный микроанализ выявил наличие трех основных областей, соответствующих охарактеризованному в работе [8] светлой, серой и темной областям. Светлая область характеризуется возможным формированием интерметаллидов  $(\text{Al}_3\text{Ni}_2)_{0,4}$  с небольшой примесью меди и железа, а также отсутствием кислорода. Серая область представляет собой неокисленный алюминий с незначительными примесями меди и железа. Темная область состоит из окисленных частичек алюминия и никеля с примесями магния, железа и меди.



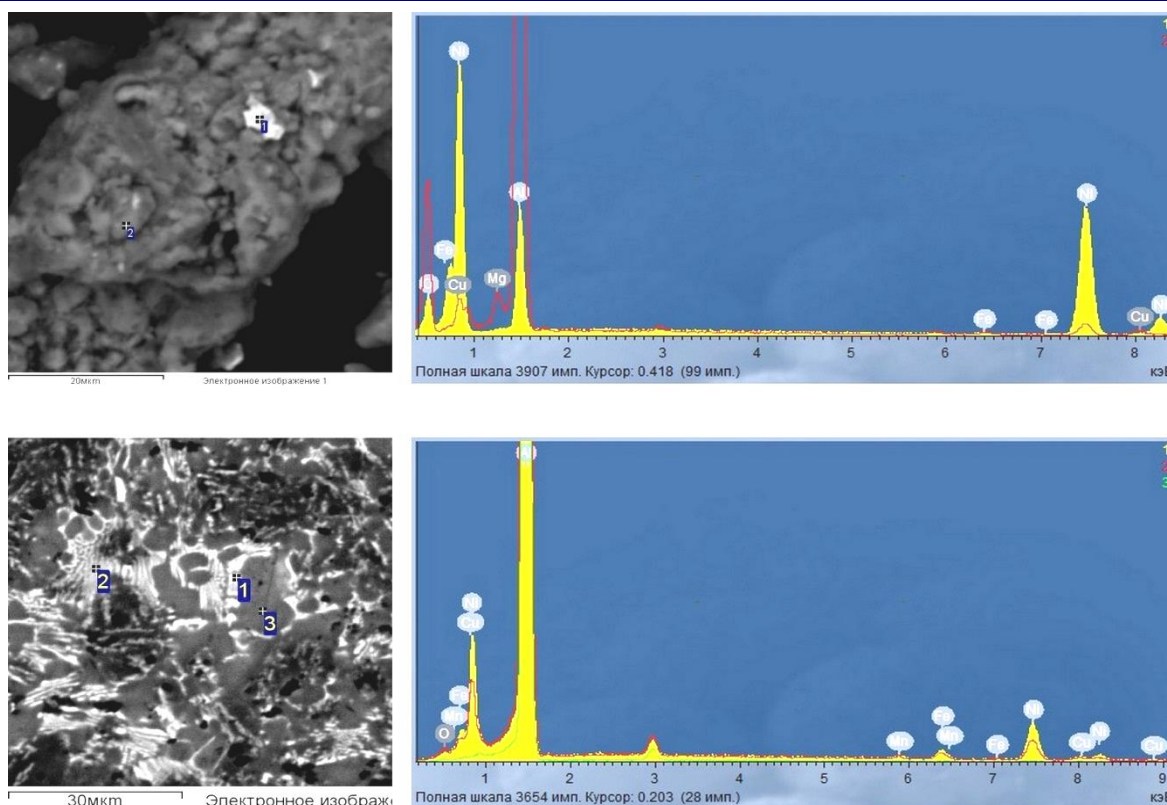


Рис. 3. Результаты рентгеноспектрального микроанализа АСП (а) и ГДПМ на основе АСППА (б): изображения микроструктуры в отраженных электронах и спектры EDX

Fig. 3. X-ray spectral microanalysis of sintered aluminum powder (a) and hot worked powder material based on sintered aluminum powder + aluminum powder (b): images of the microstructure in reflected electrons and EDX spectra

Таблица 2. Элементный состав основных фаз ГДПМ на основе АСППА

Table 2. An elemental composition of the main phases of hot worked powder material based on sintered aluminum powder + aluminum powder

Спектр	O	Mg	Al	Mn	Fe	Ni	Cu
1	2,04	-	84,15	0,53	1,91	10,19	1,18
2	1,38	-	97,83	-	-	0,24	0,56
3	24,50	1,67	71,49	-	0,16	0,89	1,28

### Закключение

Построены дифференциальные кривые распределения частиц порошка для шихты после МХА и последующей ручной обработки.

На основе анализа дифрактограммы материала АСП высказана гипотеза о формировании соединения  $(Al_3Ni_2)_{0,4}$  в процессе МХА. Энергодисперсионная рентгенофлуоресцентная спектрометрия, рентгенофазовый анализ и съемка дериватограммы АСППА в среде гелия показали возможность формирования интерметаллидов при нагреве шихты. Фазовый анализ материала показал отсутствие оксидов алюминия за счёт

плакирования порошковых частиц оксидом бора в процессе МХА.

Высказана гипотеза, что причиной возникновения эндозффекта может являться контактное плавление образца.

### Список литературы

1. Dorofeev Yu.G., Bezborodov E.N., Sergeenko S.N. Special features of formation of compacted material from mechanochemically activated fining of aluminum alloy D16 // Metal Science and Heat Treatment. 2003. Т. 45. № 1–2. Р. 73–75.
2. Горячедеформированные материалы на основе механохимически активированной стружки алюминиевого сплава Д-16 / Слабкий Д.В., Федосеева М.А., Волхонский А.А., Сергеенко С.Н. // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. Т. 2, № 3 (41). С. 20–25.
3. Пат. 2202643 РФ, МПК<sup>7</sup> C22C1/05, B22F9/04. Способ получения композиционного материала из алюминиевого сплава (его вариант) и композиционный материал / А.А. Аксенов, В.С. Золоторевский, А.Н. Солонин, В.К. Портной; Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет). № 2001126240/02; заявл. 26.09.2001; опубл. 20.04.2003.

4. Пат. 2216434, РФ, МПК В22F1/00, В22F3/14. Способ изготовления горячедеформированных порошковых материалов / Ю.Г. Дорофеев, С.Н. Сергеевко, Е.Н. Безбородов. № 2001130200/02; заявл. 08.11.2001; опубл. 20.11.2003, бюл. №32.
5. Пат. 1675061 СССР, МПК<sup>5</sup> В22F9/04. Способ получения шихты из стружки алюминиевого сплава / Б.Г. Арабей, С.П. Горбач. Б.М. Перельмутер, С.А. Рыжков, С.А. Сопочкин, С.А. Степнов, В.Л. Эсикман. № 4616247/02; заявл. 06.12.88; опубл. 07.09.91, бюл. №33.
6. Слабкий Д.В. Механические свойства горячедеформированных материалов на основе механохимически активированной стружки алюминиевого сплава Д-16 // Вестник Магнитогорского государственного университета им. Г.И. Носова. 2013. № 3 (43). С. 66–68.
7. Dyuzhechkin M.K., Sergeenko S.N., Popov Y.V. Features of structure and property formation for hot-deformed materials of the Al–Si and Al–Si–C systems based on mechanochemically activated charges // Metallurgist. 2016. Т. 59. № 9–10. Р. 835–842.
8. Slabkiy D.V., Sergeenko S.N. Hot-deformed Al–Ni powder materials based on alloy D-16 mechanically-activated turnings // Metallurgist. 2016. Т. 59. № 11. Р. 1228–1233.
9. Особенности механохимической активации и уплотнения порошковой шихты Al–Si–Ni–Fe–C и Al–Cu–Fe / Сергеевко С.Н., Джураев Ф.Т., Аль Хилфи А.Х., Постников А.А. // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 4. С. 63–72.
10. Effect of mechanical alloying on the structure and property of Ni<sub>3</sub>Al fabricated by hot pressing. Meng Jie, Jia Chengchang, He Qing. J. Alloys and Compounds. 2006. 421. №1–2. Р. 200–203.
11. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е.А. Левашов, А.С. Рогачев, В.В. Курбаткина, Ю.М. Максимов, В.И. Юхвид. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 377 с.
3. Aksenov A.A., Zolotarevsky V.S., Solonin A.N., Portnoy V.K. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo materiala iz alyuminievogo splava (ego variant) i kompozitsionnyi material* [Method of manufacturing a composite material from an aluminum alloy (its option) and a composite material]. Patent RF, no. 2202643, 2003.
4. Dorofeev Yu.G., Sergeenko S.N., Bezborodov E.N. *Sposob izgotovleniya goryachedeformirovannykh poroshkovykh materialov* [Method of manufacturing hot-deformed powder materials]. Patent RF, no. 2216434, 2003.
5. Arabey B.G., Gorbach S.P., Perelmutter B.M., Ryzhkov S.A., Sopochkin S.A., Stepnov S.A., Esikman V.L. *Sposob polucheniya shikhty iz struzhki alyuminievogo splava* [Method of manufacturing a charge mixture of aluminum alloy chips]. Patent USSR, no. 1675061, 1991.
6. Slabkiy D.V. Mechanical properties of hot-deformed materials based on mechanochemically activated chips of aluminum alloy D-16. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 3 (43), pp. 66–68. (In Russ.)
7. Dyuzhechkin M.K., Sergeenko S.N., Popov Y.V. Features of a structure and property formation for hot-deformed materials of the Al–Si and Al–Si–C systems based on mechanochemically activated charges. *Metallurgist*, 2016, vol. 59, no. 9–10, pp. 835–842.
8. Slabkiy D.V., Sergeenko S.N. Hot-deformed Al–Ni powder materials based on alloy D-16 mechanically-activated turnings. *Metallurgist*, 2016, vol. 59, no. 11, pp. 1228–1233.
9. Sergeenko S.N., Dzhuraev F.T., Al Khilfi A.Kh., Postnikov A.A. Features of mechanochemical activation and compaction of Al–Si–Ni–Fe–C and Al–Cu–Fe powder blend. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Processing], 2016, no. 4, pp. 63–72. (In Russ.)
10. Meng Jie, Jia Chengchang, He Qing. Effect of mechanical alloying on the structure and property of Ni<sub>3</sub>Al fabricated by hot pressing. *J. Alloys and Compounds*, 2006, 421, no. 1–2, pp. 200–203.
11. Levashov E.A., Rogachev A.S., Kurbatkina V.V., Maksimov Yu.M., Yuxvid V.I. *Perspektivnye materialy i tekhnologii samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza* [Advanced materials and technologies of self-propagating high-temperature synthesis]. Moscow: Publishing House of MISiS, 2011, 377 p. (In Russ.)

## References

Поступила 18.08.2021; принята к публикации 26.08.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 18/08/2021; revised 26/08/2021; published 27/09/2021

**Слабкий Дмитрий Васильевич** – аспирант, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.  
Email: dmitrii666s@mail.ru. ORCID 0000-0002-3161-2865

**Сергеенко Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Email: sergeenko@gmail.com. ORCID 0000-0002-6718-4591

**Попов Юрий Витальевич** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Институт наук о Земле Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия.

Email: popov@sfedu.ru. ORCID 0000-0002-0216-5998

**Салиев Алексей Николаевич** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Email: saliev.aleksei@yandex.ru

**Dmitry V. Slabkiy** – postgraduate student, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.

Email: dmitrii666s@mail.ru. ORCID 0000-0002-3161-2865

**Sergey N. Sergeenko** – PhD (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.

Email: sergeenko@gmail.com. ORCID 0000-0002-6718-4591

**Yuri V. Popov** – PhD (Geol.&Min.), Associate Professor, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia.

Email: popov@sfedu.ru. ORCID 0000-0002-0216-5998

**Alexey N. Saliev** – PhD (Eng.), Junior Researcher, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.

Email: saliev.aleksei@yandex.ru

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 620.18

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-68-74



### ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ 3D-ПЕЧАТИ

Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Чегуров М.К.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Год от года в производстве увеличивается доля аддитивных технологий. Наибольшими темпами растет применение 3D-печати электродуговой наплавкой, как наиболее экономичной и производительной технологии. Однако имеющихся научных и практических данных недостаточно для ее успешного использования при изготовлении деталей, работающих в условиях низких температур. В связи с этим требуется более детальное исследование материалов, полученных 3D-печатью и предназначенных для работы в условиях Крайнего Севера и Арктики. **Используемые оборудование и методы.** Изготовление образцов из стали 07X25H13 выполнено на разработанном стенде, реализующем технологию 3D-печати электродуговой наплавкой, применен метод испытания на ударный изгиб по Шарпи, с использованием растрового электронного микроскопа проведен анализ фрактограмм изломов. **Новизна.** Определены механизмы разрушения при низких температурах образцов из стали 07X25H13, выполненных по технологии 3D-печати электродуговой наплавкой. Полученные результаты позволяют понять поведение материалов, напечатанных объектов в условиях низких температур, чему ранее уделялось недостаточно внимания. Выявлена связь фрактальной размерности изломов образцов и величины ударной вязкости, позволяющая оценивать влияние температуры на разрушение. **Результат.** В процессе исследования образцов, изготовленных из стали 07X25H13, установлено, что изломы, полученные после испытаний на ударную вязкость, обладают четырьмя характерными зонами: зарождения трещины; распространения трещины, утяжки, долома. Во всем исследуемом температурном диапазоне наблюдается вязкий механизм разрушения, однако с уменьшением температуры испытаний происходит снижение пластичности и уменьшение количества наблюдаемых зон. Показана связь уменьшения фрактальной размерности изображений изломов с уменьшением ударной вязкости. **Практическая значимость.** Полученные результаты дают возможность более полно понять механизмы разрушения объектов из стали 07X25H13, полученных с помощью 3D-печати электродуговой наплавкой и оценить поведение данного материала в условиях низких температур. Установленная связь фрактальной размерности излома и ударной вязкости позволяет более четко устанавливать температурные причины разрушения конструкций.

**Ключевые слова:** конструкционные стали, 3D-печать, электродуговая наплавка, фрактографический анализ, фрактальная размерность, хладостойкость.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации «Оценка хладостойкости и изучение механизмов разрушения металлов, полученных на основе 3D-печати для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в условиях Арктики и Крайнего Севера».*

© Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Чегуров М.К., 2021

#### Для цитирования

Электронно-микроскопические исследования механизмов разрушения конструкционных сталей, полученных на основе 3D-печати / Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Чегуров М.К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 68–74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-68-74>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## ELECTRON MICROSCOPY STUDIES ON THE FRACTURE MECHANISMS OF STRUCTURAL STEELS FABRICATED BY 3D PRINTING

Anosov M.S., Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Chegurov M.K.

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** From year to year, the share of additive technologies in production keeps increasing. The highest rate of growth is attributed to the use of wire and arc additive manufacturing for 3D printing as the most feasible and efficient technology. However, the available scientific and practical data are insufficient for its successful use in manufacturing parts operating at low temperatures. In this regard, it is required to carry out a more detailed study of materials produced by 3D printing and intended for operation in the Far North and the Arctic. **Equipment and Methods Applied.** The specimens from steel grade 07Kh25N13 were produced on the developed stand, implementing wire and arc additive manufacturing for 3D printing; the Charpy impact test method was applied, fractographs were analyzed using a scanning electron microscope. **Originality.** The authors determined fracture mechanisms at low temperatures applied for the specimens from steel grade 07Kh25N13 made by wire and arc additive manufacturing for 3D printing. The results obtained allow us to understand the behavior of materials and printed objects at low temperatures, which has not received enough attention previously. The authors revealed the relationship between the fractal dimension of the specimen fractures and impact toughness to estimate the effect of temperature on fracture. **Result.** The studies on the specimens from steel grade 07Kh25N13 showed that the fractures occurred after impact testing had four characteristic zones: crack initiation; propagation of cracks, tightening, and a break zone. A total temperature range under study showed a ductile fracture mechanism; however, with a decrease in test temperature, there is a decrease in plasticity and a decrease in the number of observed zones. The paper describes the relationship between a decrease in the fractal dimension of fracture images and a decrease in impact toughness. **Practical Relevance.** The results contribute to a more detailed understanding of the fracture mechanisms of the specimens from steel grade 07Kh25N13 produced by wire and arc additive manufacturing for 3D printing and assessment of the behavior of this material at low temperatures. The established relationship between the fractal dimension of the fracture and impact toughness allows us to more clearly establish the temperature reasons for the destruction of structures.

**Keywords:** structural steels, 3D printing, wire and arc additive manufacturing, fractographic analysis, fractal dimension, cold resistance.

*The research was funded by the grant of the President of the Russian Federation “Assessment of cold resistance and study on fracture mechanisms of metals fabricated by 3D printing to ensure a safe operation of facilities in the Arctic and the Far North”.*

### For citation

Anosov M.S., Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Chegurov M.K. Electron Microscopy Studies on the Fracture Mechanisms of Structural Steels Fabricated by 3D Printing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 68–74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-68-74>

### Введение

Освоение северных регионов Российской Федерации, Арктики входит в число приоритетных задач Правительства РФ. Однако активное освоение данных регионов сдерживается недостаточной надежностью механизмов и конструкций при пониженных температурах, которые требуют периодической или оперативной замены. Обеспечение надежности механизмов и конструкций обеспечивается, прежде всего, правильным выбором материала для изготовления деталей. Известно, что при понижении температуры эксплуатации механизмы разрушения металлов, особенно с ОЦК-решеткой, значительно меняются. Это при определенных условиях может привести к мгновенному хрупкому разру-

шению ответственных элементов конструкции, что недопустимо.

В настоящее время все большее количество деталей механизмов и конструкций получают с использованием технологии 3D-печати металлами. Немаловажным является применение данных подходов для изготовления деталей северного исполнения. Наиболее универсальной и динамично развивающейся технологией 3D-печати хладостойкими металлами является электродуговая наплавка [1]. Данная технология позволяет оперативно изготавливать новые детали и восстанавливать изношенные компоненты в непосредственной близости от места, где это необходимо, при этом уменьшается время не только на изготовление, но и на доставку [2, 3].

Поэтому необходимо подробно исследовать механизмы разрушения при низких температурах металлов, полученных на основе 3D-печати, чтобы иметь лучшее представление, как материал ведет себя с понижением температуры, как влияет снижение пластичности и увеличивающаяся хрупкая составляющая в изломе на поведение образцов и конструкций. Несмотря на появление ряда публикаций по изучению особенностей структуры и свойств металлов, полученных на основе технологии 3D-печати, подобных исследований, проведенных в работе, на данный момент нет [4–7].

### Материалы и методы исследования

В работе исследована сталь 07X25H13, обладающая хорошей коррозионной стойкостью и хладостойкостью, в связи с чем широко используемая для изготовления элементов конструкций, функционирующих в условиях пониженных температур.

Заготовки образцов из исследуемого материала были получены с использованием технологии 3D-печати электродуговой наплавкой на разработанном стенде, представленном на **рис. 1**.



Рис. 1. Стенд для 3D-печати электродуговой наплавкой

Fig. 1. Stand for wire and arc additive manufacturing for 3D printing

3D-печать выполнялась проволокой диаметром 0,8 мм в защитной атмосфере, Ar – 98% и CO<sub>2</sub> – 2%. Режимы 3D-печати были определены системой управления стендом исходя из условий стабильности процесса на основе способа [8], и приняли значения: сила сварочного тока 195 А, напряжение 24 В, скорость печати 400 мм/мин. В

процессе формирования заготовки выдерживался термический цикл, при котором температура слоя, по которому велась печать, выдерживалась в диапазоне 300–350°C, исходя из рекомендаций к подогреву металла [9].

Качество и стабильность структуры материала получаемых образцов обеспечивались за счет постоянной диагностики устойчивости динамической системы «источник питания – дуга – материал». После 3D-печати, с целью улучшения эксплуатационных характеристик, сталь 07X25H13 была подвергнута аустенизации (1050–1100°C, выдержка, охлаждение на воздухе).

Для оценки температуры вязкохрупкого перехода и механизмов разрушения металлов в широком диапазоне пониженных температур изготавливались образцы типа Шарпи (тип образца 13 по ГОСТ 9454) с сечением в зоне концентратора 5×8 мм.

Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре МК-30А в диапазоне температур –150...+20°C в соответствии с требованиями ГОСТ 9454. Охлаждение образцов до необходимой температуры осуществлялось в специально разработанной криокамере, показанной и описанной в литературе [10].

Фрактографический анализ проводился с применением растрового электронного микроскопа JSM-3U. Для определения температуры вязко-хрупкого перехода исследовались изломы образцов, испытанных при различных температурах. Определялось количество вязкой и хрупкой составляющих в изломе согласно ГОСТ Р ИСО 148-1-2013. За температуру вязкохрупкого перехода ( $T_{50}$ ) принималась температура, при которой количество вязкой и хрупкой составляющей составляют 50% от площади излома.

В качестве количественного показателя изображения фрактограмм образцов использовался показатель фрактальной размерности  $D_F$  [11]. Для предварительной обработки изображений изломов и определения показателя фрактальной размерности изображения  $D_F$  была разработана программа в среде MATLAB [12].

### Полученные результаты и их обсуждение

По результатам испытаний образцов из стали 07X25H13, полученных на основе 3D-печати электродуговой наплавкой, получены значения ударной вязкости металла в диапазоне температур испытания. На электронном микроскопе получены изображения изломов металлов для исследуемых температур. Результаты оценки фрактальной размерности излома стали 07X25H13 и

зависимость ударной вязкости от температуры показаны на **рис. 2**.

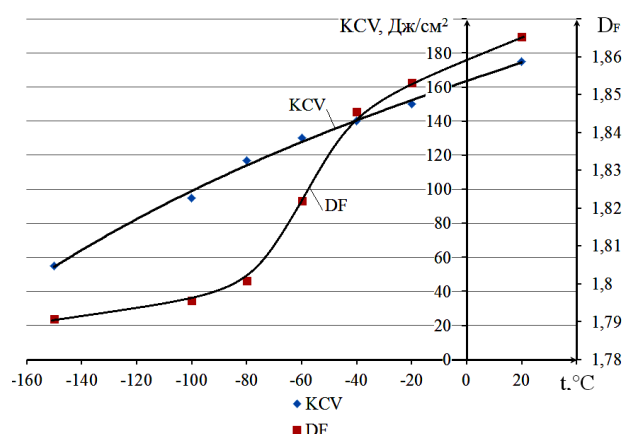


Рис. 2. Результаты оценки ударной вязкости и фрактального анализа (сталь 07X25H13)  
Fig. 2. Impact strength assessment and fractal analysis (steel grade 07Kh25N13)

Из полученных зависимостей (см. **рис. 2**) видно, что с понижением температуры испытания наблюдается монотонное снижение ударной вязкости, однако во всем диапазоне исследуемых температур она остается на достаточно высоком уровне. Показатель фрактальной размерности изображения излома снижается с понижением температура, что объясняется изменением размера ямок вязкого разрушения и снижением пластичности исследуемого материала. Таким образом, между значениями ударной вязкости и фрактальной размерностью изображения излома имеется определенная связь.

Общий вид изломов образцов стали 07X25H13 при различных температурах показан на **рис. 3** с выделением отдельных зон в изломе.

Очаг разрушения обнаружен на образце, который испытали при комнатной температуре

( $T_{\text{исп}} = +20^\circ\text{C}$ ), также на данном изломе характерно наличие четырех зон разрушения. У образцов, испытанных при пониженной температуре, наблюдается только неровность в поверхности излома, а зоны зарождения и распространения трещины не ярко выражены, утяжек на боковой поверхности излома не обнаружено. Для детального исследования механизмов разрушения стали при разных температурах проведены электронно-микроскопические исследования в трех зонах (зарождения трещины, распространения трещины и долома) образца.

Электронные фотографии изломов в зоне зарождения трещины показаны на **рис. 4**.

Как показывает анализ изломов, в зоне распространения трещины при комнатной температуре (**рис. 4, а**) наблюдаются ямки отрыва, а при пониженных температурах (**рис. 4, б, в**) – ямки сдвига, характеризующие вязкое разрушение.

Электронные фотографии изломов в зоне распространения трещины показаны на **рис. 5**.

В зоне распространения трещин во всем исследуемом диапазоне температур наблюдается полностью вязкий излом (ямки отрыва). При понижении температуры наблюдается уменьшение размера ямок, особенно при температуре  $-150^\circ\text{C}$  (**рис. 5, в**), что характеризует снижение пластичности исследуемого материала, которое подтверждается результатами испытаний на растяжение (см. **таблицу**).

Электронные фотографии зон долома образцов имеют аналогичный характер, как показано в зоне распространения трещины (см. **рис. 5**).

Все образцы, независимо от температуры испытания, имеют вязкий характер разрушения (совокупность ямок различной конфигурации), следовательно, исследуемая сталь не имеет температуры вязкохрупкого перехода в рассматриваемом диапазоне температур.

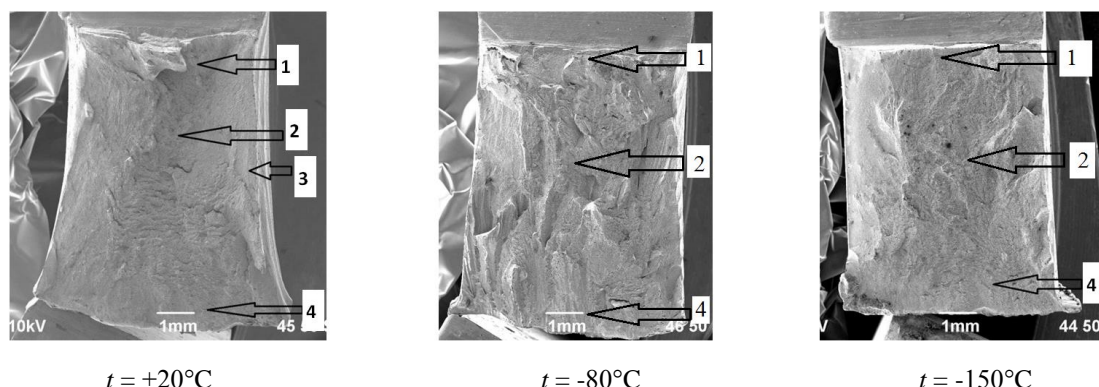


Рис. 3. Поверхности изломов образцов после испытания на ударную вязкость при различных температурах:  
1 – зона зарождения трещины; 2 – зона распространения трещины; 3 – утяжки; 4 – зона долома  
Fig. 3. Fracture surfaces of the specimens after impact toughness testing at different temperatures:  
1 is a crack initiation zone; 2 is a crack propagation zone; 3 is a tightening zone; 4 is a break zone



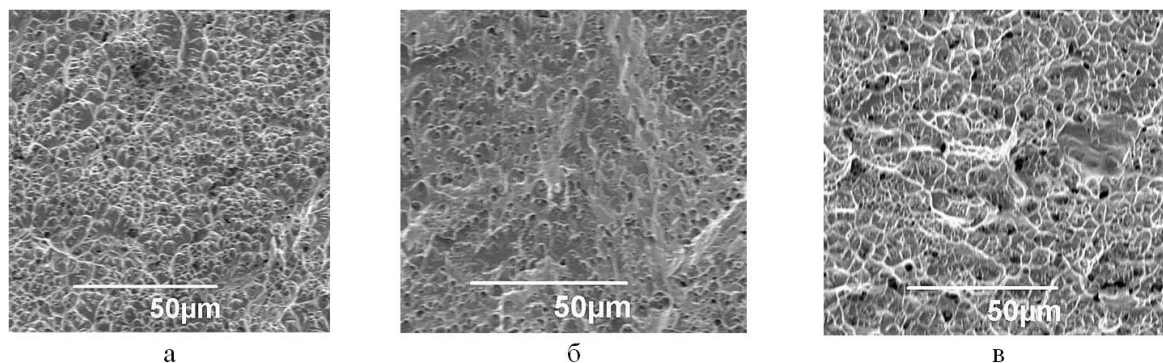


Рис. 4. Излом в зоне зарождения трещин (верхней части образцов) при температурах: а –  $t = +20^{\circ}\text{C}$ ; б –  $t = -80^{\circ}\text{C}$ ; в –  $t = -150^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Fracture in the crack initiation zone (an upper part of the specimens) at temperatures: а is  $t = +20^{\circ}\text{C}$ ; б is  $t = -80^{\circ}\text{C}$ ; в is  $t = -150^{\circ}\text{C}$

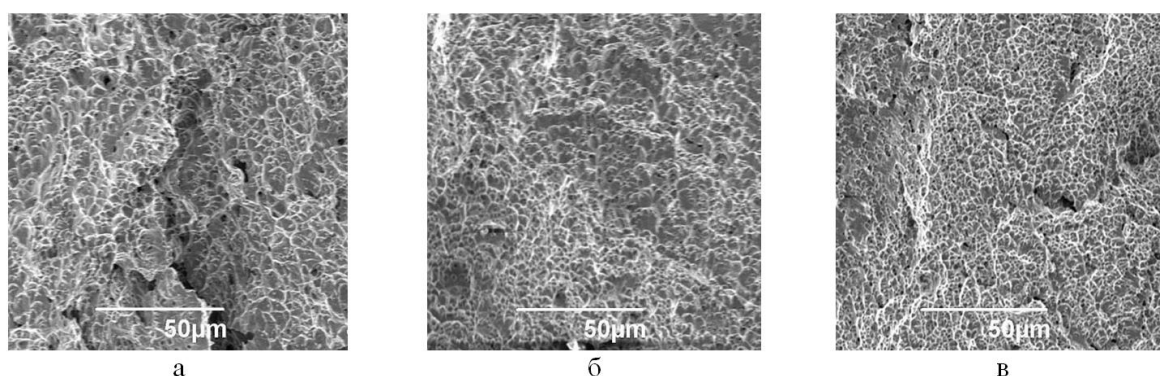


Рис. 5. Излом в зоне распространения трещин (середина образцов) при температурах: а –  $t = +20^{\circ}\text{C}$ ; б –  $t = -80^{\circ}\text{C}$ ; в –  $t = -150^{\circ}\text{C}$

Fig. 5. Fracture in the crack propagation zone (the middle of the specimens) at temperatures: а is  $t = +20^{\circ}\text{C}$ ; б is  $t = -80^{\circ}\text{C}$ ; в is  $t = -150^{\circ}\text{C}$

Таблица. Механические свойства стали 07X25H13  
T a b l e . Mechanical properties of steel grade 07Kh25N13

Материал	$t, ^{\circ}\text{C}$	Механические свойства			
		$\delta, \%$	$\sigma_{0.2}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}/\sigma_{0.2}$
07X25H13	+20	32	329	521	1,58
	-40	24	389	596	1,53
	-80	15	447	675	1,51
	-150	12	526	782	1,49

### Закключение

На основании выполненной работы установлена связь фрактальной размерности излома образца, полученного путем 3D-печати, со значениями ударной вязкости стали 07X25H13. Показатель фрактальной размерности изображения излома снижается с понижением температуры, что объясняется изменением размера ямок вязкого разрушения и снижением пластичности исследуемого материала.

Очаг разрушения обнаружен на образце, который испытывали при комнатной температуре ( $t = +20^{\circ}\text{C}$ ), также на данном изломе характерно наличие четырех зон разрушения. При понижении температуры испытания стали 07X25H13 сохраняется вязкая составляющая в изломе образцов, следовательно, исследуемая сталь не имеет температуры вязкохрупкого перехода в рассматриваемом диапазоне температур.

### Список литературы

1. Oliveira J.P., Rodrigues Tiago, Duarte Valdemar, Miranda R.M., Santos Telmo. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Materials. 2019. 12(7):1121. doi: 10.3390/ma12071121
2. Елистратова А.А., Коршакевич И.С. Технологии 3D-печати: преимущества и недостатки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Том 1. С. 557–559.
3. Mendagaliyev R., Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., Zotov O.G., Ereemeev A.D. Microstructure and



- Mechanical Properties of Laser Metal Deposited Cold-Resistant Steel for Arctic Application. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 36, pp. 249–255. ISSN 2351-9789. doi: 10.1016/j.promfg.2019.08.032
4. Анализ структуры и механических свойств сплава Co–Cr–Mo, полученного методом 3D-печати / Казанцева Н.В., Ежов И.В., Давыдов Д.И., Меркушев А.Г. // *Физика металлов и металловедение*. 2019. 120 (12). С. 1271–1278. doi: 10.1134/S0015323019120088
  5. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати / Балашов А.В., Черданцев А.О., Новиковский Е.А., Ананьин С.В., Белоplotов С.В. // *Ползуновский вестник*. 2016. № 2. С. 61–64.
  6. Смирнова Е.А., Герман М.А., Фисенкова Д.В. Структура и свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных при помощи 3D-технологии прямого нанесения металла // *Гагаринские чтения – 2019: сборник тезисов докладов XIV Международной молодежной научной конференции*. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. 924 с.
  7. Xu X., Ganguly S., Ding J., Guo S., Williams S., Martina F. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire+arc additive manufacture process. *Mater. Charact.* 2017. 143. Pp. 152–162. doi:10.1016/j.matchar.2017.12.002.
  8. Пат. 2696121 Российская Федерация, МПК B33Y10/00 B22F3/00. Способ 3D-печати на оборудовании с ЧПУ с интеллектуальной оптимизацией режимов / Ю.Г. Кабалдин, П.В. Колчин, Д.А. Шатагин, А.В. Киселев; заявитель и патентообладатель НГТУ им. Р.Е. Алексеева. № 2018125837; заявл. 13.07.2018; опубл. 31.07.2019.
  9. РД 153-34.1-003-01. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования (РТМ-1с). Введ. 2001-07-02. М., 2002. 465 с.
  10. Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Зиновьев Ю.А. Исследование хладостойкости материалов для ответственных узлов технических средств, работающих при низких температурах // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2016. Т. 4. № 2. С. 14–17.
  11. Савенков Г.Г., Барахтин Б.К. Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение // *ПМТФ*. 2011. Т. 52. №6. С. 177–184.
  12. Kabaldin Y.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. Evaluation of the mechanism of the destruction of metals based on approaches of artificial intelligence and fractal analysis // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 709 (2020) 033076 IOP Publishing doi: 10.1088/1757-899X/709/3/033076.
  - (WAAM). *Materials*. 2019. 12(7):1121. doi: 10.3390/ma12071121
  2. Elistratova A.A., Korshakevich I.S. 3D printing technologies: advantages and disadvantages. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Currently Important Issues of Aviation and Cosmonautics], 2015, vol. 1, pp. 557–559. (In Russ.)
  3. Mendagaliyev R., Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., Zotov O.G., Ereemeev A.D. Microstructure and mechanical properties of laser metal deposited cold-resistant steel for Arctic application. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 36, pp. 249–255. ISSN 2351-9789. doi: 10.1016/j.promfg.2019.08.032
  4. Kazantseva N.V., Ezhov I.V., Davydov D.I., Merkushev A.G. Analysis of the structure and mechanical properties of the Co–Cr–Mo alloy obtained by 3D printing. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metal Science], 2019, 120 (12), pp. 1271–1278. doi:10.1134/S0015323019120088
  5. Balashov A.V., Cherdantsev A.O., Novikovskiy E.A., Ananin S.V., Beloplotov S.V. Study on strength of the products manufactured by 3D printing. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovskiy Bulletin], 2016, no. 2, pp. 61–64. (In Russ.)
  6. Smirnova E.A., German M.A., Fisenkova D.V. Structure and properties of samples from titanium alloy Ti-6Al-4V, fabricated by 3D technology of direct metal deposition. *Gagarinskie chteniya – 2019. Sbornik tezisev dokladov XIV Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii* [Gagarin Readings – 2019. Book of abstracts of the 14th International Youth Scientific Conference]. Moscow Aviation Institute (National Research University), 2019, 924 p. (In Russ.)
  7. Xu X., Ganguly S., Ding J., Guo S., Williams S., Martina F. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire+arc additive manufacture process. *Mater. Charact.* 2017, 143, pp. 152–162. doi:10.1016/j.matchar.2017.12.002.
  8. Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Kiselev A.V. *Sposob 3D pechati na oborudovanii s ChPU s intellektualnoy optimizatsiey rezhimov* [Method of 3D printing on CNC equipment with intelligent optimization of modes]. Patent RF, no. 2696121, 2019.
  9. Guiding Document RD 153-34.1-003-01. Welding, heat treatment and control of pipe systems of boilers and pipelines during the installation and repair of a power plant (PTM-1c). Introduced on 02.07.2001. Moscow, 2002, 465 p.
  10. Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Zinoviev Yu.A. Study on cold resistance of materials for critical components of facilities operating at low temperatures. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal], 2016, vol. 4, no. 2, pp. 14–17. (In Russ.)
  11. Savenkov G.G., Barakhtin B.K. Relationship between the fractal dimension of the fracture surface and a set of standard tensile characteristics of the material. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics], 2011, vol. 52, no. 6, pp. 177–184. (In Russ.)

## References

1. Oliveira J.P., Rodrigues Tiago, Duarte Valdemar, Miranda R.M., Santos Telmo. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing

12. Kabaldin Y.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. and fractal analysis. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 709 (2020) 033076 IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/709/3/033076.

Поступила 30.03.2021; принята к публикации 26.05.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 30/03/2021; revised 26/05/2021; published 27/09/2021

**Аносов Максим Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

**Кабалдин Юрий Георгиевич** – доктор технических наук, профессор,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659

**Колчин Павел Владимирович** – аспирант,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: posledny@mail.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

**Шатагин Дмитрий Александрович** – кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: dmitsanych@gmail.com. ORCID 0000-0003-1293-4487

**Чегуров Михаил Константинович** – кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: mkchegurov@mail.ru. ORCID 0000-0001-5408-1887

**Maxim S. Anosov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

**Yuri G. Kabaldin** – DrSc (Eng.), Professor,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659

**Pavel V. Kolchin** – postgraduate student,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: posledny@mail.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

**Dmitry A. Shatagin** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: dmitsanych@gmail.com. ORCID 0000-0003-1293-4487

**Mikhail K. Chegurov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: mkchegurov@mail.ru. ORCID 0000-0001-5408-1887

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.762

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83



## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИП НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖ 159

Хлыбов А.А.<sup>1</sup>, Беляев Е.С.<sup>1</sup>, Рябцев А.Д.<sup>2</sup>, Беляева С.С.<sup>1</sup>,  
Гетмановский Ю.А.<sup>1</sup>, Явтушенко П.М.<sup>2</sup>, Рябов Д.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет, им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>ПАО «Русполимет», Кулебаки, Нижегородская обл., Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В работе исследованы механические свойства формовок из порошка сплава ВЖ159, полученные методом горячего изостатического прессования (ГИП). Формовки имели различную плотность, что реализовано прерыванием цикла ГИП при заданных температурах. Прерывание цикла ГИП выполнялось при температурах 670, 700, 750, 800, 900, 1150°C. Уменьшение доли пор в дисперсном теле приводит к росту прочности по экспоненциальному закону. **Используемые методы.** Порошок ВЖ159 получен методом газовой атомизации. Для исследования применена фракция порошка -70 + 25 мкм, имеющая насыпную плотность 3,77 г/см<sup>3</sup>, текучесть 2,3 г/с, удельную поверхность 446 см<sup>2</sup>/г и средний размер частиц по Фишеру 16 мкм. Исходный порошок имеет достаточно высокое значение удельной поверхности, что предопределяет сорбирование его поверхностью газов, с которыми он имеет контакт. Наличие сорбированных газов на поверхности порошка перед ГИП недопустимо, так как в процессе нагрева и одновременного приложения давления сорбированные газы переходят в твердый раствор, располагаясь по границам исходных частиц порошка, что резко снижает механические свойства компактов. Для исключения этого явления перед ГИП порошок в капсуле подвергался вакуумной термической дегазации. **Новизна.** Полученные компакты проходили термическую обработку, состоящую из закалки и старения. Старение выполнялось по двум вариантам: два или четыре цикла старения после закалки. Установлено, что структура беспористых прессовок ГИП имеет более дисперсное зерно (балл 9) по сравнению с литым сплавом (балл 7) аналогичного состава. Термическая обработка с четырьмя циклами старения обеспечивает увеличение значения предела прочности на растяжении при приемлемом уровне относительного удлинения. **Практическая значимость.** Исследование микроструктуры компактов после ГИП и термической обработки показало отсутствие сетки остаточных границ гранул (PPBs-PriorParticleBoundaries), что свидетельствует о корректных режимах вакуумной термической дегазации порошка.

**Ключевые слова:** технология горячего изостатического прессования, металлические порошки, пористость, никелевые сплавы, механические свойства.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высоко-технологичного производства материалов, изделий и оборудования с использованием аддитивных технологий и технологий газостатирования» на базе ПАО «РУСПОЛИМЕТ» по соглашению № 075-11-2019-084 от 18.12.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года № 218).*

© Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М., Рябов Д.А., 2021

### Для цитирования

Влияние технологии ГИП на структуру и свойства никелевого сплава ВЖ 159 / Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М., Рябов Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 75–83. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# INFLUENCE OF THE HIP TECHNOLOGY ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF NICKEL ALLOY VZH159

Khlybov A.A.<sup>1</sup>, Belyaev E.S.<sup>1</sup>, Ryabtsev A.D.<sup>2</sup>, Belyaeva S.S.<sup>1</sup>,  
Getmanovsky Yu.A.<sup>1</sup>, Yavtushenko P.M.<sup>2</sup>, Ryabov D.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>PJSC Ruspolymet, Kulebaki, Nizhny Novgorod Region, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** This paper studies the mechanical properties of moldings from powder of alloy VZh159 produced by the hot isostatic pressing (HIP) method. The moldings had different densities as a result of interrupting the HIP cycle at specified temperatures. The HIP cycle was interrupted at temperatures of 670, 700, 750, 800, 900, 1150°C. A decrease in a share of pores in a dispersed body leads to an exponential increase in strength. **Methods Used.** VZh159 powder was produced by a gas atomization method. To carry out the study, the authors used a powder fraction of -70+25 microns, having a bulk density of 3.77 g/cm<sup>3</sup>, a flow rate of 2.3 g/s, a specific surface of 446 cm<sup>2</sup>/g and an average particle size according to Fischer of 16 microns. The original powder has a sufficiently high specific surface area, which predetermines its absorption by the surface of contacting gases. The presence of sorbed gases on the surface of the powder before HIP is unacceptable because in the process of heating and simultaneous application of pressure, the sorbed gases pass into a solid solution along the boundaries of the initial powder particles, sharply reducing the mechanical properties of compacts. To eliminate this phenomenon, the powder in the capsule was subjected to vacuum thermal degassing before HIP. **Novelty.** The produced compacts underwent heat treatment, consisting of quenching and aging. Aging was carried out in two ways: two or four aging cycles after quenching. It has been established that the structure of the HIP compacts has a more dispersed grain (9 points) in comparison with the cast alloy (7 points) of a similar composition. Heat treatment with four aging cycles provides an increase in ultimate tensile strength at an acceptable level of percentage elongation. **Practical Relevance.** The study on the microstructure of compacts after HIP and heat treatment showed no grid of residual grain boundaries (PPBs - Prior Particle Boundaries), indicating correct vacuum thermal degassing modes for the powder.

**Keywords:** hot isostatic pressing technology, metal powders, porosity, nickel alloys; mechanical properties.

*This research was carried out with the financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the project "Creation of high-tech production of materials, products and equipment using additive and gasostatic technologies" at PJSC RUSPOLYMET under agreement No. 075-11-2019-084 dated December 18, 2019 (Decree of the Government of the Russian Federation dated April 09, 2010, No. 218).*

## For citation

Khlybov A.A., Belyaev E.S., Ryabtsev A.D., Belyaeva S.S., Getmanovsky Yu.A., Yavtushenko P.M., Ryabov D.A. Influence of the HIP Technology on the Structure and Properties of Nickel Alloy VZH159. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 75–83. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83>

## Введение

Горячее изостатическое прессование (ГИП) предназначено для изготовления изделий и заготовок из порошков и гранул, является заключительным процессом компактирования порошка. Одной из основных задач ГИП является устранение пористости и повышение однородной структуры материала. В процессе ГИП осуществляется одновременное воздействие на заготовку высокой температуры и давления с выдержкой при этих параметрах в течение заданного времени, создаваемого в газостате инертным газом, под воздействием которого происходит уплотнение материала заготовки по механизмам пластической деформации, интенсивной кратковременной ползучести и диффузионной сварки. В качестве среды, передающей давление на заго-

товку, обычно используется инертный газ, например аргон [1, 2].

Равенство давления, создаваемого в газостате по всем направлениям приводит к изотропности свойств материала. Приложение высокого давления обеспечивает получение теоретической плотности материала при температурах 0,8–0,9T<sub>пл</sub>, что недостижимо при спекании без давления. Благодаря этому ГИП, как правило, делает возможным более точное воздействие на микроструктуру материала и позволяет получать детали с высокодисперсной структурой, повышенными механическими свойствами, высокими эксплуатационными характеристиками [3, 4].

Использование специальных капсул (форм, близких к конечной форме изготавливаемой детали) позволяет получать изделия с высоким коэффициентом использования материала с повы-



шенными механическими свойствами: пределом прочности, относительным удлинением, ударной вязкостью. Технологии ГИП эффективны для широкого круга сплавов при изготовлении ответственных высоконагруженных изделий. ГИП является актуальной научно-технической задачей.

В работе рассматривается влияние плотности спекаемого материала на свойства образцов, получаемых в процессе их изготовления.

### Материалы и методы исследований

Объектом исследования выбран жаропрочный никелевый деформируемый сплав марки ВЖ159 системы Ni–Cr–Mo–Nb–Al. Порошок сплава был получен методом распыления аргоном. Химический состав порошка соответствует составу стали ВЖ159 (ХН58МБЮ, ГОСТ 5632-2014), приведен в **табл. 1**. Измерения произведены на рентгенофлуоресцентном анализаторе «X-Strata 980 ф» Oxford Instruments, размер коллиматора – 0,3 мм.

Таблица 1. Химический состав порошка ВЖ159

Table 1. Chemical composition of VZh159 powder

Химический элемент	Содержание, масс. %		
Ti	0,42	±	0,105
Cr	26,34	±	0,395
Mn	0,12	±	0,192
Fe	1,47	±	0,839
Ni	60,63	±	0,349
Cu	0,20	±	0,069
Nb	3,15	±	0,0059
Mo	7,21	±	0,016
W	0,16	±	0,106

Форму частиц порошка изучали с помощью микроскопа Keyence VHX – 1000.

Частицы порошка каждой фракции имеют преимущественно округлую форму (**рис. 1**). С увеличением размера частиц становится отчетливо видно дендритное строение частиц порошка, а форма частиц имеет незначительные отклонения от округлой. Более крупные частицы имеют на поверхности закрепленные более мелкие частицы. Эта особенность характерна для всех фракций порошка.

Пористость образцов определяли путем гидростатического взвешивания, а также оценивали по результатам анализа изображений микрофотографий с использованием программы ImagePro. Испытания на сжатие проводили на испытательной машине УМЭ-10ТМ, оборудованной нагревательным устройством, обеспечивающим температуру испытаний до 1200°C. По-

грешность измерения составляет 1%. Контроль за температурой испытаний осуществлялся термопарой типа ТХА, установленной внутри нагревательной печи. Далее термопара подключалась к модулю АЦП-ЦАП, который обеспечивает регистрацию параметров на компьютер.

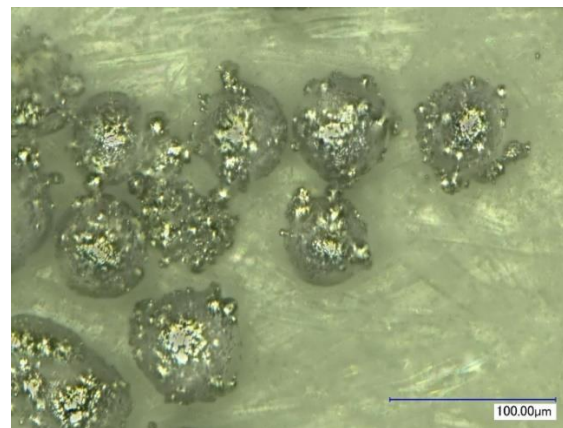


Рис. 1. Внешний вид поверхности частиц порошка ВЖ-159. x1000

Fig. 1. Surface of VZh159 powder particles. x1000

### Анализ результатов исследований

Для изготовления образцов порошки засыпали в цилиндрическую капсулу до достижения необходимой плотности засыпки 66–67%.

Далее проводили дегазацию в вакууме при подъеме температуры до 650°C со скоростью 60–100°C/ч. Дегазация необходима для удаления газов, поглощенных поверхностью порошка при их изготовлении и последующих технологических операциях. Необходимость выполнения дегазации объясняется достаточно большой удельной поверхностью порошка и, как следствие, его повышенной химической активностью. В целом влияние газовых примесей на свойства сплавов негативное и, как правило, приводит к снижению механических свойств. Газы в беспористых прессовках, полученных ГИП, образуют простые химические соединения [4, 5–7] – оксиды, карбиды, нитриды, а также более сложные, например оксикарбонитриды. После выполнения цикла дегазации капсула герметизировалась с помощью сварки с последующим контролем герметичности неразрушающими методами. После герметизации капсулы в камеру газостата закачивали аргон, создавали давление 60 МПа и осуществляли нагрев газа.

На **рис. 2** приведена зависимость изменения давления в рабочей камере от температуры. В данном случае эти параметры связаны по закону Шарля уравнением

$$P = 0,132T.$$

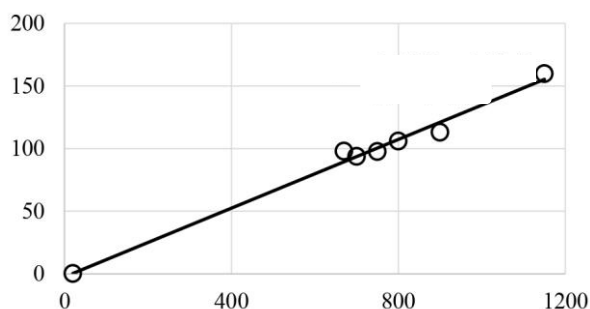


Рис. 2. Изменение давления в газостате в зависимости от температуры

Fig. 2. Pressure change in the gasostat depending on temperature

Для оценки изменения плотности заготовок в процессе ГИП и для определения влияния плотности получаемых заготовок на предел текучести проводили серию экспериментов по прерванному циклу ГИП: при достижении температуры и давления в газостате некоторых промежуточных значений делаем резкое снижение температуры и давления. Это приводит к «замороженной» плотности, то есть плотности, соответствующей достигнутой температуре и давлению на момент их резкого снижения. В результате этих экспериментов могут быть получены данные о плотности и пределе текучести заготовок при определённом давлении и температуре в газостате (результаты приводятся в табл. 2).

Таблица 2. Влияние параметров прерванного цикла на характеристики получаемого материала  
Table 2. Influence of the parameters of the interrupted cycle on the characteristics of the produced material

Образец	Цикл ГИП		$\sigma_{0.2}^c$ , МПа	$\sigma_{0.2}^c$ , МПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Относительная плотность
	$T$ , °C	$P$ , МПа	пористый	монокристалл		
ВЖ 159	670	98	21,3	610	5,02	0,61
	700	93,6	42,8	570	5,59	0,68
	750	97,6	75,6	450	5,82	0,71
	800	106	92,5	345	6,1	0,74
	900	113	95	200	7,23	0,88
	1150	160	100	100	8,2	1

Для определения механических свойств (испытание на сжатие) из полученной заготовки методом электроэрозионной резки вырезали образцы со следующими геометрическими размерами: диаметр 15 мм, высота 25 мм.

Как видим из табл. 2, с увеличением температуры прерванного цикла плотность образцов

возрастает, также растет предел текучести образцов. Следует отметить, что при температуре 670 и 700°C наблюдается хрупкое разрушение полученных образцов (рис. 3). Диаграмма сжатия при температуре испытаний 670°C приведена на рис. 4.



а



б

Рис. 3. Образец ВЖ 159 при 670°C:  
а – до разрушения; б – после разрушения  
Fig. 3. Specimen of VZh159 at 670°C:  
a is before destruction; b is after destruction



Рис. 4. Диаграмма сжатия образца ВЖ 159 при 670°C  
Fig. 4. Compression diagram of the specimen of VZh159 at 670°C

Используя уравнение Е.А Рышкевича, связывающее относительную плотность и предел текучести, возможно достаточно точно рассчитать относительную плотность при заданной температуре (рис. 5). Испытания показали, что с увеличением относительной плотности зависимость предела текучести возрастает (рис. 6). Также наблюдается переход от хрупкого разрушения к вязкому, пластические свойства получаемых образцов улучшаются.

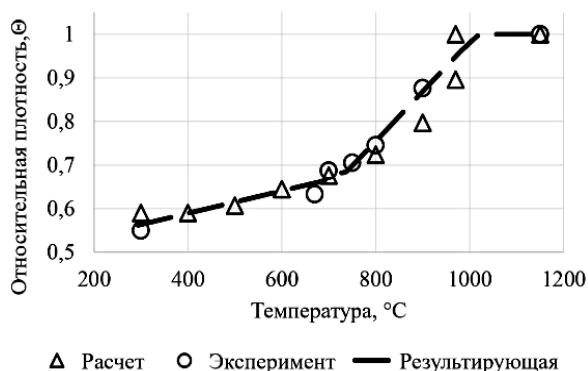


Рис. 5. Зависимость относительной плотности от температуры прерванного цикла

Fig. 5. Dependence of the relative density on the temperature of the interrupted cycle

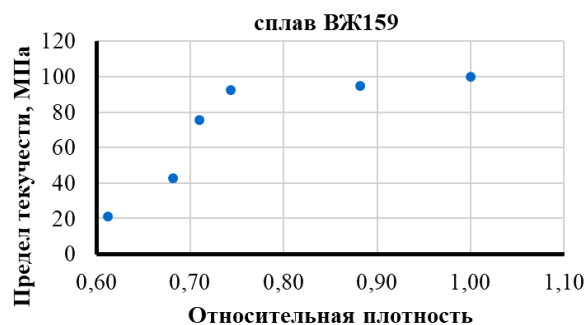
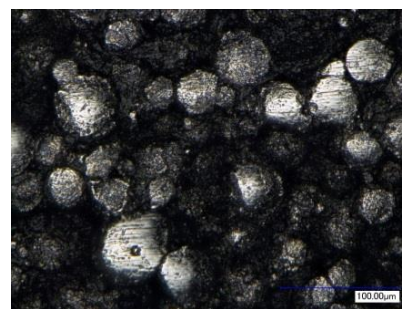


Рис. 6. Зависимость предела текучести от относительной плотности

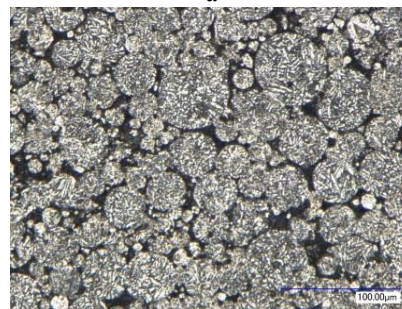
Fig. 6. Dependence of the yield point on the relative density

На рис. 7 приведены фотографии микроструктур, полученных для различных относительных плотностей. При температуре 700°C наблюдаются отдельные «порошинки» (рис. 7, а), которые при внешнем давлении в газостате взаимодействуют упруго. Кроме того, эта фотография также подтверждает высокую пористость образцов, полученных для выбранных режимов газостатирования. С ростом температуры плотность возрастает, наблюдается деформация порошка (рис. 7, б). При температуре 1150°C наблюдаем структуру материала, аналогичную структуре монолитного материала. Плотности материалов, по-

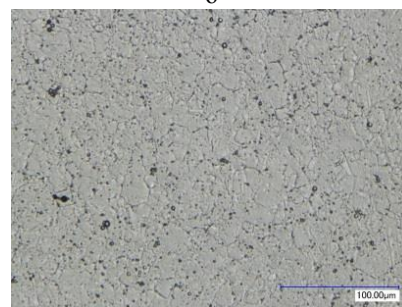
лученных методом ГИП и монолитного материала, совпадают.



а



б



в

Рис. 7. Структуры материалов: а – при 700°C; б – при 900°C; в – при 1150°C

Fig. 7. Material structures: а is at 700°C, б is at 900°C, в is at 1150°C

Известно, что ГИП для стареющих сплавов по структурному состоянию является эквивалентом закалки: в таком состоянии для металла характерна наиболее высокая пластичность и недостаточная прочность. Для достижения оптимального комплекса механических свойств дисперсионно-твердеющие сплавы после ГИП должны подвергаться старению. Для заготовок из сплава ВЖ159 старение проводится в две ступени: высокотемпературное и последующее низкотемпературное с охлаждением на воздухе после каждой ступени.

Полученные после ГИП компакты были подвергнуты термической обработке по двум вариантам:

– двукратное старение (закалка 1100°C, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе; старение 800°C, вы-



держка 10 ч, охлаждение на воздухе; старение 700°C, выдержка 15 ч, охлаждение на воздухе);

– четырехкратное старение (закалка 1100°C, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе; старение 900°C, выдержка 5 ч, охлаждение на воздухе; старение 800°C, выдержка 10 ч, охлаждение на воздухе; старение 700°C, выдержка 10 ч, охлаждение на воздухе; старение 650°C, выдержка 10 ч, охлаждение на воздухе).

Закалка и старение выполнены в лабораторной печи СНОЛ 8,2/1100.

Целью термической обработки сплава ВЖ-159 является получение высокодисперсной микроструктуры, состоящей из твердого раствора с дисперсными включениями карбидов и  $\gamma'$ -фазы. После закалки формируется гомогенный твердый раствор, а в процессе старения выделяются упрочняющие фазы, размер которых во многом зависит от режимов старения.

Для сравнения на **рис. 8** приводятся микроструктуры заготовок, полученных ГИП и выплавленных в индукционной печи. Приведенные микроструктуры свидетельствуют о значительном измельчении зерна в заготовках, полученных ГИП. Независимо от режима старения средний размер зерна в заготовках после ГИП соот-

ветствует 9-му баллу, а в заготовках полученных литьем – 7-му баллу по ГОСТ 5639-82. Размер зерна в заготовке после ГИП на 30% меньше, чем в литой.

После ГИП и термической обработки формируется высокий уровень механических свойств: предел прочности на растяжение до 1226 МПа при относительном удлинении 37%. Полученные механические свойства существенно превосходят требуемые согласно СТО 78721433-048-2014 по пределу прочности на 21–22% и по относительному удлинению на 36–45%. Такие свойства, очевидно, обусловлены размером зерна за счет применения тонких порошков для ГИП.

В **табл. 3** приводятся данные о механических свойствах заготовок, полученных ГИП после дву- и четырехкратного режимов старения.

Следует отметить, что при двукратном старении получаем предел прочности на уровне 1167 МПа и относительное удлинение 41%, а при четырехкратном – 1226 МПа и 29%. Четырехкратное старение гарантирует получение более прочного материала, однако и более хрупкого. Такие различия связаны с размерами выделившихся упрочняющих фаз в результате старения.

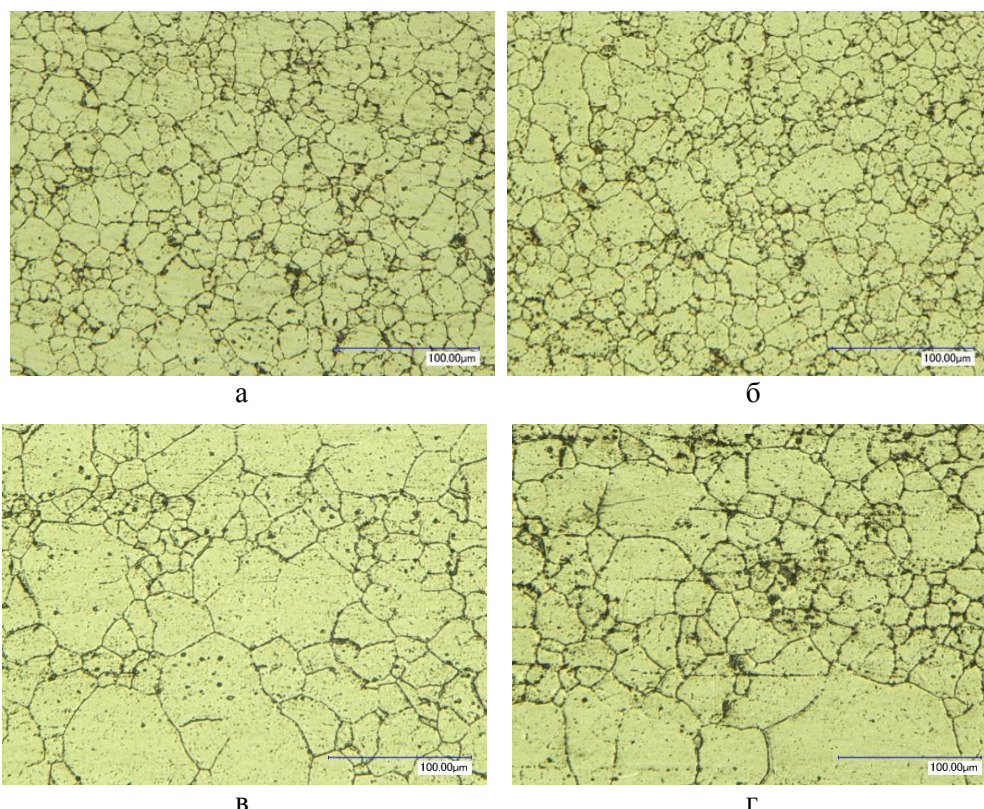


Рис. 8. Микроструктура образцов из сплава ВЖ159: а – ГИП, двукратное старение; б – ГИП, четырехкратное старение; в – литье, двукратное старение; г – литье, четырехкратное старение. Увеличение  $\times 1000$

Fig. 8. Microstructure of the VZh159 alloy specimens: а is HIP, double aging; б is HIP, fourfold aging; в is casting, double aging; г is casting, fourfold aging.  $\times 1000$  magnification



Таблица 3. Механические свойства заготовок, полученных ГИП, после закалки и двукратного или четырехкратного старения

Table 3. Mechanical properties of workpieces produced by HIP after quenching and double or fourfold aging

Старение	Температура испытания $T_{\text{и}}$ , °C	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см <sup>2</sup>
2-кратное	25	1167	794	32	41	46
	850	343	329	44	37	-
4-кратное	25	1226	873	29	37	37

Проведенный количественный металлографический анализ пористости материала после проведения ГИП и термической обработки, а также последующей высокотемпературной выдержки показал, что после ГИП и последующей термической обработки объемная доля пор в материале не превышает 0,004%, а последующая длительная выдержка при рабочих температурах влияния на пористость не оказывает – сохраняются практически идентичные низкие значения.

### Заключение

1. Рассмотрена технология изготовления сплава ВЖ-159 методом ГИП и ее ключевые этапы:

- проведен анализ необходимости процесса вакуумной дегазации порошка;
- рассмотрен цикл ГИП и обоснован выбор режимов прерванного цикла;
- получены значения относительной плотности заготовки от параметров цикла.

2. Установлено, что компакты, полученные ГИП, имеют более высокодисперсную микроструктуру. Показано, что в образцах, полученных ГИП, структура соответствует 9-му баллу, а для литых образцов 7-му баллу зерна по ГОСТ 5639-82.

4. Механические свойства компактов, полученных ГИП, превосходят требования НТД по пределу прочности на 21–22% и по относительному удлинению на 36–45%.

### Список литературы

1. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство. 1997. №4. С. 4–11.
2. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок / Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №SP2. С. 98–103.
3. Моисеев С.А., Латышев В.Б. Жаропрочные свариваемые сплавы для узлов статора современных и перспективных авиационных ГТД // Авиационные

материалы и технологии. 2003. №1. С. 152–157.

4. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
5. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения / Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
6. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД / Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. // Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 6–16.
7. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков / Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
8. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками / Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г., Семенов Б.И. и др. // Известия вузов. Сер. Машиностроение. 2016. №9 (678). С. 62–80.
9. Влияние горячего изостатического прессования и термической обработки на свойства сплава ЭП648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления / Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Карачевцев Ф.Н., Мазалов И.С. // Технология машиностроения. 2015. №9. С. 11–16.
10. Ломберг Б.С., Моисеев С.А. Жаропрочные и деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №6. С. 2–5.
11. Жаростойкое покрытие для защиты высокопрочных сложнолегированных никелевых сплавов от высокотемпературной газовой коррозии / Солнцев С.Ст., Швагирева В.В., Исаева Н.В., Соловьева Г.А. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №6. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-4-4.
12. Технологические параметры получения деталей холодной штамповкой из листовых заготовок жаропрочных сплавов ВЖ159, ВЖ171 и высоко-

- прочного сплава ВЖ172 / Ломберг Б.С., Капитаненко Д.В., Мазалов И.С., Бубнов М.В. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015. №8. С. 14–19.
13. Мазалов И.С., Евгенов А.Г., Прагер С.М. Перспективы применения жаропрочного структурно-стабильного сплава ВЖ159 для аддитивного производства высокотемпературных деталей ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 3–7. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-3-7.
  14. Евгенов А.Г., Горбовец М.А., Прагер С.М. Структура и механические свойства жаропрочных сплавов ВЖ159 и ЭП648, полученных методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15.
  15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
- ### References
1. Sorokin L.I. Weldability of heat-resistant alloys used in aircraft gas turbine engines. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production], 1997, no. 4, pp. 4–11. (In Russ.)
  2. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. High heat-resistant wrought nickel alloys for promising gas turbine engines and gas turbine plants. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mashinostroenie* [Herald of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering], 2011, no. SP2, pp. 98–103. (In Russ.)
  3. Moiseev S.A., Latyshev V.B. Heat-resistant weldable alloys for stator assemblies of modern and advanced aircraft gas turbine engines. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2003, no. 1, pp. 152–157. (In Russ.)
  4. Kablov E.N. *Tendentsii i orientiry innovatsionnogo razvitiya Rossii: sb. nauch.-informats. mater.* [Trends and guidelines for innovative development in Russia: book of scientific and information papers]. 3rd ed. Moscow: VIAM, 2015, 720 p. (In Russ.)
  5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., Sidorov V.V. Priorities of development of technologies for the production of heat-resistant materials for aircraft engine building. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya* [Issues of Ferrous Metallurgy and Material Science], 2013, no. 3, pp. 47–54. (In Russ.)
  6. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Casting heat-resistant nickel alloys for promising aircraft gas turbine engines. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2007, no. 2, pp. 6–16. (In Russ.)
  7. Evgenov A.G., Rogalev A.M., Nerush S.V., Mazalov I.S. Study on the properties of EP648 alloy produced by selective laser fusion of metal powders. *Trudy VIAM: electron. nauch.-tekhnich. zhurn.* [Proceedings of VIAM: electronic scientific and technical journal], 2015, no. 2, paper 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (Accessed on October 16, 2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
  8. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ospennikova O.G., Semenov B.I. et al. Metal powder compositions of EP648 heat-resistant alloy produced by FSUE VIAM State Scientific Center of the Russian Federation using technologies of selective laser alloying, laser gas-powder surfacing and high-precision casting of polymers filled with metal powders. *Izvestiya vuzov. Ser.: Mashinostroenie* [News of Higher Educational Institutions. Series: Mechanical Engineering], 2016, no. 9 (678), pp. 62–80. (In Russ.)
  9. Evgenov A.G., Rogalev A.M., Karachevtsev F.N., Mazalov I.S. Influence of hot isostatic pressing and heat treatment on the properties of EP648 alloy synthesized by selective laser fusion. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of Machine Building], 2015, no. 9, pp. 11–16. (In Russ.)
  10. Lomberg B.S., Moiseev S.A. Heat-resistant and wrought alloys for modern and promising gas turbine engines. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopedic Reference Book], 2007, no. 6, pp. 2–5. (In Russ.)
  11. Solntsev S.St., Shvagireva V.V., Isaeva N.V., Solovieva G.A. A heat-resistant coating for protection of high-strength complex-alloyed nickel alloys from high-temperature gas corrosion. *Trudy VIAM: electron. nauch.-tekhnich. zhurn.* [Proceedings of VIAM: electronic scientific and technical journal], 2014, no. 6, paper 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (Accessed on October 16, 2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-4-4.
  12. Lomberg B.S., Kapitanenko D.V., Mazalov I.S., Bubnov M.V. Technological parameters of producing parts by cold stamping from sheet blanks of heat-resistant alloys VZh159, VZh171 and high-strength alloy VZh172. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Metal Forming], 2015, no. 8, pp. 14–19. (In Russ.)
  13. Mazalov I.S., Evgenov A.G., Prager S.M. Prospects for the use of heat-resistant structurally stable alloy VZh159 for the additive production of high-temperature gas turbine engine parts. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2016, no. S1 (43), pp. 3–7. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-3-7.
  14. Evgenov A.G., Gorbovetz M.A., Prager S.M. Structure and mechanical properties of VZh159 and EP648 heat-resistant alloys produced by selective laser fusion. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2016, no. S1 (43), pp. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15.
  15. Kablov E.N. Innovative applications developed by FSUE VIAM State Scientific Center of the Russian Federation to implement "The 2030 strategic priorities for the development of materials and technologies for their processing". *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

**Хлыбов Александр Анатольевич** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: hlybov\_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

**Беляев Евгений Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: yaneck@bk.ru. ORCID 0000-0001-6870-5558

**Рябцев Анатолий Данилович** – доктор технических наук, профессор, директор центра научно-технического и инновационного развития ПАО «Русполимет», Кулебаки, Нижегородская область, Россия. Email: a.ryabtsev@ruspolymet.ru

**Беляева Сулгун Сабуровна** – аспирант, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: sulgun888@mail.ru. ORCID 0000-0001-9042-1404

**Гетмановский Юрий Андреевич** – аспирант, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: getmanovskij@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4338-3414

**Явтушенко Павел Михайлович** – начальник отдела центра научно-технического и инновационного развития ПАО «Русполимет», Кулебаки, Нижегородская область, Россия. Email: p.yavtushenko@ruspolymet.ru

**Рябов Дмитрий Александрович** – аспирант, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID: 0000-0002-0486-598X

**Alexander A. Khlybov** – DrSc (Eng.), Head of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: hlybov\_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

**Evgeny S. Belyaev** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: yaneck@bk.ru. ORCID 0000-0001-6870-5558

**Anatoly D. Ryabtsev** – DrSc (Eng.), Professor, Director of the Center for Scientific, Technical and Innovative Development of PJSC Ruspolymet Kulebaki, Nizhny Novgorod Region, Russia. Email: a.ryabtsev@ruspolymet.ru

**Sulgun S. Belyaeva** – postgraduate student, teaching assistant of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: sulgun888@mail.ru. ORCID 0000-0001-9042-1404

**Yuri A. Getmanovsky** – postgraduate student, teaching assistant of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: getmanovskij@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4338-3414

**Pavel M. Yavtushenko** – Head of the Department of the Center for Scientific, Technical and Innovative Development of PJSC Ruspolymet Kulebaki, Nizhny Novgorod Region, Russia. Email: p.yavtushenko@ruspolymet.ru

**Dmitry A. Ryabov** – postgraduate student, teaching assistant of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X

# СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

## STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.778

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-84-89



### УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ МЕТИЗНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ РОБАСТНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Пивоварова К.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Для метизных предприятий жизненно важными являются вопросы обеспечения заданного уровня потребительских свойств новых и традиционных видов продукции на основе эффективного управления качеством в процессах технологической обработки. При проектировании технологических процессов метизного производства всегда присутствуют шумовые факторы, такие как неточные исходные данные, связанные с неопределенностью условий окружающей среды, неравномерным качеством сырья, несовершенством технологического оборудования. В связи с этим актуальным вопросом является разработка методологии проектирования процессов изготовления метизных изделий, учитывающая параметрическую неопределенность исходных данных. В настоящее время одним из приоритетных и активно развивающихся направлений является робастное параметрическое проектирование. Применение робастной оптимизации дает возможность разработать технологию, нечувствительную к вариациям шумовых факторов. Метод основан на использовании ортогональных матриц, которые представляют собой минимальный набор экспериментов с различными комбинациями уровней параметров. Робастный эксперимент связан с двумя матрицами: матрицей параметров управления и матрицей шумовых факторов. Предлагается методология для проектирования новых и совершенствования действующих технологических процессов метизного производства с применением робастной оптимизации. Данная процедура может быть применена как для проектирования новой технологии, так и для совершенствования действующей. Для сведения показателей качества в единую целевую функцию предлагается использовать серый реляционный анализ (GRA), метод, который анализирует степень и уровень отношения разнородных параметров для их дискретной последовательности. Робастный подход может быть эффективно использован применительно к разработке новых и совершенствованию действующих процессов изготовления металлических изделий. Практическое применение данной методологии позволит существенно сократить время принятия технологических решений по обеспечению заданного уровня качества готовой продукции.

**Ключевые слова:** метизное производство, робастная оптимизация, робастность, робастный эксперимент, шумовые факторы, показатели качества, дисперсионный анализ, GRA.

© Пивоварова К.Г., 2021

#### Для цитирования

Пивоварова К.Г. Управление качеством метизной продукции на основе робастного параметрического проектирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 84–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-84-89>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# METALWARE QUALITY MANAGEMENT BASED ON A ROBUST PARAMETER DESIGN

Pivovarova K.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The issues of ensuring a set level of consumer properties of new and conventional types of products by efficient quality management in treatment processes are vital for metalware plants. When designing technological processes of metalware production, there are always noise factors, such as inaccurate initial data associated with the uncertainty of ambient conditions, a varying quality of raw materials, and imperfection of technological equipment. In this regard, an urgent issue is to develop a methodology for designing the processes of manufacturing metalware, taking into account parameter uncertainty of initial data. Now, one of the actively developing priorities is a robust parameter design. The use of robust optimization makes it possible to develop a technology that is insensitive to variations of noise factors. The method is based on using orthogonal matrices, representing a minimum set of experiments with various combinations of levels of parameters. A robust experiment is associated with two matrices: a matrix of control parameters and a matrix of noise factors. The paper describes a suggested methodology of designing new and improving existing technological processes of metalware production using robust optimization. This procedure may be applied both for designing a new technology and improving the existing one. To reduce quality indicators to a single objective function, a grey relational analysis (GRA) is used. This is a method of analyzing the degree and level of correlation between different parameters for their discrete sequence. A robust approach may be efficiently applied for developing new and improving existing processes of manufacturing metalware. A practical application of this methodology will significantly reduce time required to work out technological solutions for ensuring a set level of quality of finished products.

**Keywords:** metalware production, robust optimization, robustness, robust experiment, noise factors, quality indicators, ANOVA, GRA.

## For citation

Pivovarova K.G. Metalware Quality Management Based on a Robust Parameter Design. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 84–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-84-89>

## Введение

Создание все более сложных узлов, агрегатов и механизмов с новым уровнем потребительских свойств, стремление к минимизации затрат на переработку и максимальной продолжительности эксплуатационного срока продукции определяют тенденцию постоянного ужесточения требований потребителей к показателям качества металлических изделий. В связи с этим для метизных предприятий жизненно важными являются вопросы обеспечения заданного уровня потребительских свойств новых и традиционных видов продукции [1].

Производство металлических изделий (метизов) характеризуется широкой номенклатурой типоразмеров, индивидуальными характеристиками каждого изделия, а также многостадийностью производства. В этих условиях эффективно управлять качеством уже на этапе проектирования технологии [2]. При проектировании технологических процессов метизного производства всегда присутствуют неточные исходные данные, связанные с неопределенностью условий окружающей среды, неравномерным качеством сырья, несовершенством технологического оборудования. В условиях

существующей параметрической неопределенности управление процессом должно быть устойчивым, то есть обеспечивать заданный уровень показателей качества [1-3].

Существующие методологии проектирования процессов метизного производства являются недостаточно гибкими, поскольку требуют большого объема статистических данных для анализа и принятия решений. Они не позволяют управлять качеством на этапе освоения технологии, тем самым замедляя выход на стадию серийного производства. В связи с этим на сегодняшний день актуальной задачей является разработка методологии проектирования метизного производства, учитывающей параметрическую неопределенность исходных данных, позволяющей улучшить качество продукции, а также снизить стоимость проектирования технологии.

## Полученные результаты и их обсуждение

Решить эту задачу возможно с помощью метода робастной оптимизации. Робастность – это состояние, в котором характеристики технологии, процесса или продукции нечувствительны (в определенном диапазоне) к воздействию де-

стабилизирующих факторов (внешней среды или производственных). Робастная оптимизация позволяет разработать технологию, нечувствительную к вариациям шумовых факторов [4-6].

На **рис. 1** приведена предлагаемая схема проектирования технологических процессов метизного производства. Данная процедура может быть применена как для проектирования новой технологии, так и для совершенствования действующей.

Робастный подход используется для оптимизации параметров процесса при минимальном количестве экспериментов. Эксперименты могут быть выполнены одним из двух способов: посредством компьютерного или физического моделирования. Компьютерное моделирование возможно, если существует математическая модель процесса, связывающая показатель качества с влияющими на него параметрами. В ином случае выполняется физическое моделирование.

В общем случае все входные переменные, способные объяснить результат эксперимента, можно разделить на две основные группы: те, которыми мы реально управляем (т. е. выбираем их значения по своему усмотрению), и те, которыми мы управлять не можем. Входные переменные, значения которых специальным образом изменяются во время исследования, называются параметрами управления. Факторы, которыми невозможно управлять, называются шумовыми факторами. На этапе выбора шумовых факторов и параметров управления необходимо правильно их идентифицировать.

Метод основан на использовании ортогональных матриц, которые представляют собой минимальный набор экспериментов с различными комбинациями уровней параметров [7].

Робастный эксперимент связан с двумя матрицами: матрица параметров управления и матрица шумовых факторов. Матрица параметров управления определяет их экспериментальные значения. Ее столбцы представляют собой параметры управления, а строки – различные комбинации значений параметров. Матрица шумовых факторов определяет экспериментальные значения шумовых факторов. Ее столбцы представляют собой шумовые факторы, а строки – различные комбинации значений шумовых факторов.

Каждая строка матрицы параметров управления сочетается со всеми строками матрицы шумовых факторов. Таким образом, реализуемый план робастного проектирования представляет собой произведение матрицы параметров управления и матрицы шумовых факторов.

В примере на **рис. 2** имеется 9 комбинаций параметров управления и 4 комбинации шумовых факторов [8]. Целевая характеристика качества оценивается для 4-х промежуточных значений, полученных для каждого из 9-ти наборов параметров управления.

Таким образом, вариация множества значений целевой функции имитирует выход значений показателя качества для заданных параметров управления. Множество результатов наблюдений для каждого набора параметров используется для вычисления критерия, называемого выходной статистикой. Вычисленные значения выходной статистики используются для оценки оптимальных значений параметров управления. В качестве выходной статистики используется отношение «сигнал-шум» SN. Это отношение выражается через среднее квадратическое отклонение от середины поля допуска показателя качества.

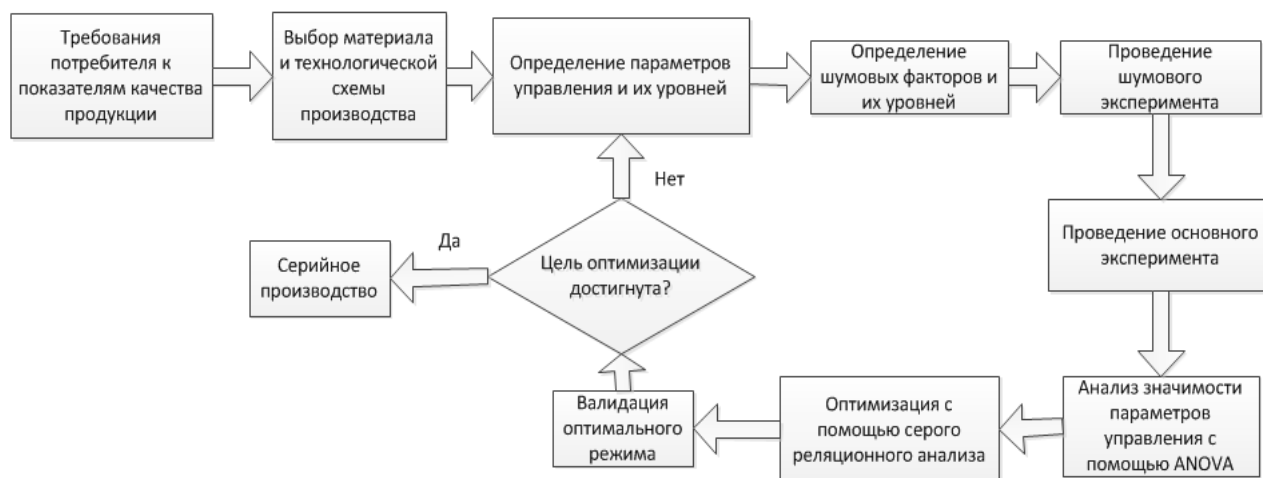


Рис. 1. Методология проектирования процессов метизного производства на основе робастной оптимизации  
Fig. 1. Methodology of designing metalware production processes based on robust optimization

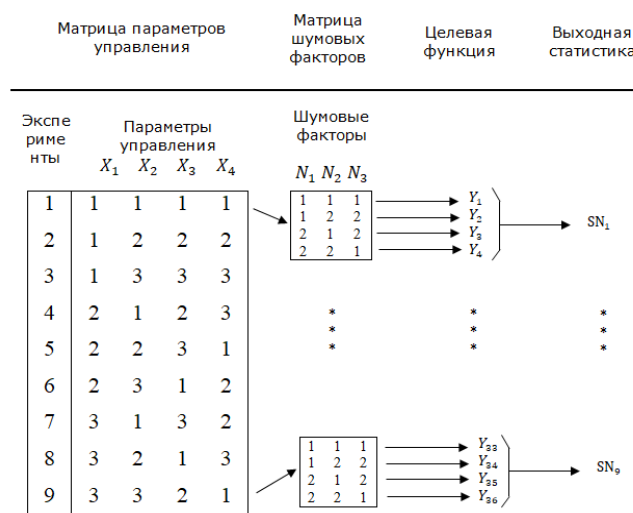


Рис. 2. Схема робастного эксперимента  
Fig. 2. Scheme of a robust experiment

Отношение SN зависит от цели. Существует три типа целевых функций: цель – номинальное значение (для двустороннего допуска), цель – меньшее значение (для одностороннего допуска с верхней границей); цель – большее значение (для одностороннего допуска с нижней границей).

Соотношение SN задается следующими выражениями:

– цель – номинальное значение:

$$SN = 10 \cdot \lg \frac{\bar{y}^2}{S^2}; \quad (1)$$

– цель – меньшее значение:

$$SN = 10 \cdot \lg \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{S^2}; \quad (2)$$

– цель – большее значение:

$$SN = 10 \cdot \lg \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n}, \quad (3)$$

где  $y$  – измеренное значение показателя качества;  $\bar{y}$  – среднее измеренное значение показателя качества;  $S$  – среднеквадратическая ошибка результатов измерений;  $n$  – количество измерений.

Для каждого опыта основного плана вычисляется отношение SN и анализируется его зависимость от каждого управляющего фактора, фиксируя те значения факторов, при которых SN достигает максимума. Полученный вариант значений ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) соответствует робастному оптимальному режиму, обеспечивающему желаемое значение выходного показателя  $y$  и одно-

временно минимизирующему его изменчивость. Такой робастный вариант дает наилучшее значение показателя качества  $y$  с одновременной минимизацией потерь производителя.

Для интерпретации экспериментальных результатов робастного эксперимента используется дисперсионный анализ. Дисперсионный анализ – это численный подход, используемый для анализа индивидуального влияния независимых переменных на целевую функцию. Цель анализа состоит в том, чтобы определить значение  $p$ -критерия для каждого параметра управления. Фактор, имеющий наименьшее значение  $p$ , оказывает наибольшее влияние на выходную характеристику [9, 10].

Оптимальные технологические параметры, полученные в результате анализа Тагути, не одинаковы для различных показателей качества. Следовательно, используемый метод необходимо дополнить методом принятия решений. Для сведения показателей качества в единую целевую функцию используется серый реляционный анализ (GRA), метод, который анализирует степень и уровень отношения разнородных параметров для их дискретной последовательности [11].

На первом этапе GRA проводится нормирование экспериментальных данных в диапазоне от 0 до 1 в соответствии с целью «номинал – лучше» по зависимости [12]:

$$z_{ij} = 1 - \frac{|y_{ij} - y_j^*|}{\max_j y_{ij} - y_j^*}, \quad (4)$$

где  $y_{ij}$  – величина отклика для  $j$ -го эксперимента;  $y_j^*$  – целевое (номинальное) значение отклика.

Для цели «больше – лучше» нормирование проводится по зависимости

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}. \quad (5)$$

Для цели «меньше – лучше» нормирование проводится по зависимости

$$z_{ij} = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}. \quad (6)$$

Серый реляционный коэффициент, который рассчитывается для определения соотношения между идеальным и фактическим экспериментальными результатами, определяется как

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_j |z_i^0 - z_{ij}| + \varphi \max_j |z_i^0 - z_{ij}|}{|z_i^0 - z_{ij}| + \varphi \max_j |z_i^0 - z_{ij}|}, \quad (7)$$

где  $z_i^0 = 1$  – это идеальный результат (т.е. лучший нормализованный результат) для  $i$ -й характеристики качества,  $\varphi = [0, 1]$  – коэффициент отличия, целью которого является ослабление эффекта  $\max_j |z_i^0 - z_{ij}|$ , когда он становится слишком большим и, следовательно, увеличивает разницу значимости серого реляционного коэффициента. В общем, его значение принимается равным 0,5, если все параметры процесса имеют равный вес [13].

Для интеграции полученных значений коэффициентов  $\varepsilon_{ij}$  для каждого эксперимента в интегрированную реляционную оценку используется метод весовых коэффициентов. Общая оценка множественных характеристик качества определяется по зависимости

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^n \omega_i \varepsilon_{ij}, \quad (8)$$

где  $\omega_i$  – вес  $i$ -го фактора.

Для того чтобы убедиться, получено ли какое-либо улучшение результатов с помощью оптимальных параметров, проводится валидационный эксперимент. Относительная оценка серого реляционного коэффициента при оптимальном режиме рассчитывается следующим образом [14]:

$$\gamma = \bar{\gamma} + \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \bar{\gamma}), \quad (9)$$

где  $\bar{\gamma}$  – среднее значение серого реляционного коэффициента;  $\gamma_i$  – среднее значение серого

реляционного коэффициента при оптимальном режиме;  $n$  – количество параметров управления, существенно влияющих на целевые функции.

Если валидационный эксперимент показал улучшение показателей качества, значит, цель оптимизация достигнута.

## Заключение

В работе предложена методология проектирования процессов метизного производства на основе робастной оптимизации. Робастный подход может быть эффективно использован применительно к разработке новых и совершенствованию действующих процессов изготовления металлических изделий. Практическое применение данной методологии позволит существенно сократить время принятия технологических решений по обеспечению заданного уровня качества готовой продукции. Использование робастного планирования эксперимента позволяет заложить устойчивость показателей качества к различным видам шумовых воздействий на этапе проектирования технологического процесса.

## Список литературы

1. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства: монография / А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, Г.С. Гун, М.А. Полякова. М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2012. 164 с.
2. Pivovarova K.G., Korchunov A.G. Methodology for managing quality indicators of hardware products with elements of robust design. *Chernye Metally*. 2020, Issue 12, pp. 38-43. doi: 10.17580/chm.2020.12.05
3. Корчунов А.Г., Лысенин А.В. Управление качеством метизной продукции в условиях неопределенности технологической информации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3. С. 45-48.
4. Кирич Ю.П., Кирьянов В.В. Робастное управление технологическими процессами производства губчатого титана // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 2. С. 120-123.
5. Feng S., Tesi P. Resilient control under denial-of-service: Robust design. *Automatica*. 2017, vol. 79, pp. 42-51. doi:10.1016/j.automatica.2017.01.031
6. Bertsimas D., Gupta V., Kallus N. Data-driven robust optimization. *Mathematical Programming*. 2018, vol. 167, pp. 235-292. doi:10.1007/s10107-017-1125-8
7. Amit Kaushal, Rajath Alexander, P.T. Rao, Jyoti Prakash, Kinshuk Dasgupta. Artificial neural network, Pareto optimization, and Taguchi analysis for the synthesis of single-walled carbon nanotubes. *Carbon Trends*. 2021, vol. 2, 10016. doi:10.1016/j.cartre.2020.100016
8. Варжапетян А. Г. Современные инструменты менеджмента качества. Робастное проектирование: учебное пособие. СПб.: ГУАП, 2008. 172 с.



9. Ghalme S., Mankar A., Bhalerao Y. Integrated Taguchi-simulated annealing (SA) approach for analyzing wear behaviour of silicon nitride. *Journal of applied research and technology*. 2019, vol. 15, no. 6, pp. 624-632. doi: 10.1016/j.jart.2017.08.003
10. Alsaadi N., Sheeraz M. A. Design and optimization of bimorph energy harvester based on Taguchi and ANOVA approaches. *Alexandria Engineering Journal*. 2020, vol. 59, Issue 1, pp. 117-127. doi:10.1016/j.aej.2019.12.016
11. Agboola O.O., Ikubanni P.P., Adeleke A.A., Adediran A.A., Adesina O.S., Aliyu S.J., Olabamiji T.S. Optimization of heat treatment parameters of medium carbon steel quenched in different media using Taguchi method and grey relational analysis. *Heliyon*. 2020, vol. 6, Issue 7, e04444. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04444
12. Umamaheswarrao P., Ranga Raju D., Suman KNS, Ravi Sankar B. Multi objective optimization of process parameters for hard turning of AISI 52100 steel using Hybrid GRA-PCA. *Procedia computer science*. 2018, vol. 133, pp. 703-710. doi:10.1016/j.procs.2018.07.129
13. Naqiuddin N. H., Saw L.H., Yew M.C., Yusof F., Poon H.M., Cai Z., Thiam H.S. Numerical investigation for optimizing segmented micro-channel heat sink by Taguchi-Grey method. *Applied Energy*. 2018, vol. 222, pp. 437-450. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.186
14. Das M. K., Kumar K., Barman T. Kr., Sahoo P. Optimization of surface roughness and MRR in electrochemical machining of EN31 tool steel using grey-Taguchi approach. *Procedia Materials Science*. 2014, vol. 6, pp. 729-740. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.089
15. *tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin], 2016, no. 2. pp. 120-123. (In Russ.)
5. Feng S., Tesi P. Resilient control under denial-of-service: Robust design. *Automatica*. 2017, vol. 79, pp. 42-51. doi:10.1016/j.automatica.2017.01.031
6. Bertsimas D., Gupta V., Kallus N. Data-driven robust optimization. *Mathematical Programming*. 2018, vol. 167, pp. 235-292. doi:10.1007/s10107-017-1125-8
7. Amit Kaushal, Rajath Alexander, P.T. Rao, Jyoti Prakash, Kinshuk Dasgupta. Artificial neural network, Pareto optimization, and Taguchi analysis for the synthesis of single-walled carbon nanotubes. *Carbon Trends*. 2021, vol. 2, 10016. doi:10.1016/j.cartre.2020.100016
8. Varzhapetyan A.G. *Sovremennyye instrumenty menedzhmenta kachestva. Robastnoe proektirovanie: uchebnoe posobie* [Modern quality management tools. Robust design: a textbook]. Saint Petersburg: GUAP, 2008, 172 p. (In Russ.)
9. Ghalme S., Mankar A., Bhalerao Y. Integrated Taguchi-simulated annealing (SA) approach for analyzing wear behaviour of silicon nitride. *Journal of Applied Research and Technology*. 2019, vol. 15, no. 6, pp. 624-632. doi: 10.1016/j.jart.2017.08.003
10. Alsaadi N., Sheeraz M. A. Design and optimization of bimorph energy harvester based on Taguchi and ANOVA approaches. *Alexandria Engineering Journal*. 2020, vol. 59, issue 1, pp. 117-127. doi:10.1016/j.aej.2019.12.016
11. Agboola O.O., Ikubanni P.P., Adeleke A.A., Adediran A.A., Adesina O.S., Aliyu S.J., Olabamiji T.S. Optimization of heat treatment parameters of medium carbon steel quenched in different media using Taguchi method and grey relational analysis. *Heliyon*. 2020, vol. 6, issue 7, e04444. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04444
12. Umamaheswarrao P., Ranga Raju D., Suman KNS, Ravi Sankar B. Multi objective optimization of process parameters for hard turning of AISI 52100 steel using Hybrid GRA-PCA. *Procedia Computer Science*. 2018, vol. 133, pp. 703-710. doi:10.1016/j.procs.2018.07.129
13. Naqiuddin N.H., Saw L.H., Yew M.C., Yusof F., Poon H.M., Cai Z., Thiam H.S. Numerical investigation for optimizing segmented micro-channel heat sink by Taguchi-Grey method. *Applied Energy*. 2018, vol. 222, pp. 437-450. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.186
14. Das M.K., Kumar K., Barman T.Kr., Sahoo P. Optimization of surface roughness and MRR in electrochemical machining of EN31 tool steel using grey-Taguchi approach. *Procedia Materials Science*. 2014, vol. 6, pp. 729-740. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.089

## References

1. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravlenie kachestvom produktsii v tekhnologiyakh metiznogo proizvodstva: monografiya* [Product quality management in metalware production technologies: monograph]. Moscow: Ore and metals, 2012, 164 p. (In Russ.)
2. Pivovarova K.G., Korchunov A.G. Methodology for managing quality indicators of hardware products with elements of robust design. *Chernye Metally*. 2020, issue 12, pp. 38-43. doi: 10.17580/chm.2020.12.05
3. Korchunov A.G., Lysenin A.V. Metalware quality management in conditions of uncertain process information. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, vol. 39, no. 3, pp. 45-48. (In Russ.)
4. Kirin Yu.P., Kiryanov V.V. Robust management of sponge titanium production processes. *Nauchno-*

Поступила 07.08.2021; принята к публикации 26.08.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 07/08/2021; revised 26/08/2021; published 27/09/2021

**Пивоварова Ксения Григорьевна** – кандидат технических наук, доцент,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: k.pivovarova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9961-4074

**Ksenia G. Pivovarova** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: k.pivovarova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9961-4074

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658.562  
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101



## КАЧЕСТВО МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ В ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОСНОВА

Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Николаев А.А., Тюлюмов А.Н.,  
Злыдарев Н.В., Дерябин Д.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Показатели качества готовой продукции определяют ее востребованность на потребительском рынке. Для принятия решения о применимости материалов и конструкций в строительной отрасли до настоящего времени остается наиболее целесообразным выполнение экспериментальных исследований, результаты которых требуют последующего анализа с использованием информационной базы данных и знаний. Целью экспериментального исследования, приведенного в работе, является генерация новых знаний о качестве бетонных образцов в условиях нового информационного поля, консолидирующего информацию о результатах натурных испытаний и видеопотоки, которые получены в ходе активных лабораторных экспериментов изучения. **Используемые методы.** При проведении экспериментальных исследований использована традиционная технология испытания бетонных образцов на центральное сжатие, которая сопровождалась непрерывным мониторингом и формированием видеопотока для каждого образца. **Новизна.** Отличительной особенностью исследования является формирование информационного поля экспериментов, которое содержит три уровня: уровень исходных данных, уровень анализа исходных данных и уровень генерации новых знаний. Уровень анализа исходных данных с использованием видеопотока позволяет по завершении эксперимента получить сведения, которые в режиме реального времени зафиксировать невозможно. **Результат.** В работе приведены примеры развития трещин на поверхности образца в динамике. Для исследуемых образцов получены временные интервалы с различной скоростью развития дефекта. Доказана возможность использования алгоритмов фильтрации и алгоритма Кенни для обработки изображений бетонных образцов в процессе от начала их нагружения и до разрушения. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволили выявить новые возможности формирования информационного поля при проведении традиционных экспериментальных исследований качества бетонных образцов и на основе полученной информации выявлять закономерности развития нарушения сплошности поверхности в динамике, которые не могут быть обнаружены при использовании органолептических методов контроля. Новые возможности формирования информационного поля позволяют в режиме реального времени получать и обрабатывать информацию о состоянии бетонных и железобетонных конструкций строительных объектов по показателям качества и на основании получаемых данных прогнозировать риск возникновения аварий, в том числе на опасных производственных объектах.

**Ключевые слова:** показатели качества продукции, бетонные образцы, экспериментальная основа, информационное поле, генерация новых знаний о качестве.

*Работа выполнялась при финансовой поддержке ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» по договору № 247715 от 05.07.2021 г.*

© Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Николаев А.А., Тюлюмов А.Н.,  
Злыдарев Н.В., Дерябин Д.И., 2021

### Для цитирования

Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности: эмпирическая основа / Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Николаев А.А., Тюлюмов А.Н., Злыдарев Н.В., Дерябин Д.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 90–101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## QUALITY OF MATERIALS, PRODUCTS AND STRUCTURES IN INDUSTRIAL SAFETY: AN EMPIRICAL BASIS

Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Nikolaev A.A., Tyulyumov A.N., Zlydarev N.V., Deryabin D.I.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Quality indicators of finished products determine its demand in the consumer market. To decide on the applicability of materials and structures in the construction industry, it is currently the most appropriate to perform experimental studies, whose results are to be analyzed using an information database and knowledge. **Objectives.** The purpose of the experimental study presented in the paper is to generate new knowledge about the quality of concrete samples in a new information field that consolidates information about the results of full-scale tests and video streams that are obtained during active laboratory experiments. **Methods Applied.** When conducting the experimental studies, the authors used a conventional technology of testing concrete samples for axial compression accompanied by continuous monitoring and a video stream for each sample. **Originality.** A distinctive feature of the study is the information field of experiments, which contains three levels: the level of initial data, the level of analyzing the initial data and the level of generating new knowledge. At the end of the experiment, the level of analyzing the initial data using the video stream results in getting information that cannot be captured in real time. **Results.** The paper presents the examples of crack propagation on the sample surface. The samples under study were used to calculate time intervals at various rates of defect growth. It has been proved that filtration algorithms and the Canny edge detector can be used to process images of the concrete samples from the beginning of their loading till their fracture. **Practical Relevance.** The results were used to identify new opportunities for forming the information field during conventional experimental studies of the quality of concrete samples and, using the information obtained, to identify development patterns of surface discontinuity that cannot be detected using organoleptic control methods. New opportunities for forming the information field contribute to obtaining and processing real time information on the state of concrete and reinforced concrete structures of construction projects in terms of their quality and, using such data, to predict the risk of accidents, including at hazardous production facilities.

**Keywords:** product quality indicators, concrete samples, experimental basis, information field, generation of new knowledge about quality.

*The study was funded by PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works under Contract No. 247715 dated July 05, 2021.*

### For citation

Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Nikolaev A.A., Tyulyumov A.N., Zlydarev N.V., Deryabin D.I. Quality of Materials, Products and Structures in Industrial Safety: an Empirical Basis. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 90–101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101>

### Введение

Показатели качества готовой продукции определяют ее востребованность на потребительском рынке. Большое количество регулирующих и нормативных документов определяют условия оценки качества готовых материалов, изделий и конструкций во всех отраслях экономики. Не является исключением и строительное производство, в котором прочностные характеристики материалов, изделий и конструкций являются гарантией безопасности функционирования объектов гражданского и промышленного назначения (опасные производственные объекты) на стадии их эксплуатации [1–3]. Одним из распространенных материалов в строительстве является бетон и железобетон. Испытания контрольных бетонных образцов железобетонных

конструкций позволяют гарантировать их безопасное функционирование в составе зданий и сооружений в процессе эксплуатации.

Для принятия решения о применимости материалов и конструкций в строительной отрасли до настоящего времени остается наиболее целесообразным выполнение экспериментальных исследований, результаты которых требуют последующего анализа полученной информации с использованием новых информационных технологий и искусственного интеллекта. Современный уровень развития вычислительной техники и программного обеспечения позволяет к таким исследованиям подключить инструменты компьютерного зрения и интеллектуального анализа [4, 5]. С точки зрения методологии научного исследования, изложенной в широко цитируемой книге «Методология» авторов А.М. Новикова и

Д.А. Новикова, эмпирические методы-операции и методы-действия составляют основу изучения объекта и предмета исследования. Эмпирический этап научного исследования является составной частью технологической фазы проектирования и основой для оценки соответствия полученных результатов поведению реальных изучаемых процессов [6, 7]. Полное эмпирическое исследование включает три вида экспериментов [8, 9], среди которых:

- промышленный пилотажный эксперимент-изучение или эксперимент-преобразование;
- специализированный лабораторный эксперимент-изучение;
- вычислительный эксперимент-преобразование.

Анализ теоретических и практических разработок в области испытания бетонных образцов показал, что наибольшее внимание уделяется:

- 1) вычислению напряженно-деформированного состояния образцов на основе теоретических расчетов [10–13];
- 2) прогнозированию сроков службы железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях климатических воздействий и агрессивной среды [14, 15];
- 3) разработке способов и устройств для проведения лабораторных испытаний при изучении свойств бетонных образцов [16–18];
- 4) подбору добавок в состав бетона для изменения его структуры и прочностных свойств [19, 20];
- 5) развитию методов разрушающего и неразрушающего контроля при исследовании образцов [21–24].

Несмотря на большое количество теоретических и практических исследований по испытанию бетонных образцов, остается актуальным вопрос проведения их экспериментального изучения для выявления новых знаний о характеристиках для дальнейшего прогнозирования поведения готовых изделий и конструкций в условиях эксплуатационной и сверхэксплуатационной нагрузки.

Наличие и бурное развитие новых BIM-технологий позволяет выполнить предикативный анализ проектируемых строительных объектов с использованием результатов проведенных натурных экспериментов. Наличие современных средств вычислительной техники и программного обеспечения позволяет в настоящее время сформировать новый уровень информационного сопровождения экспериментальных исследований. Расширение информационных полей как по качеству, так и по количеству хранимой информации позволяет реализовать одну из задач национального проекта «Наука»: увеличение количества работ по профильной деятельности «Генерация знаний» на 20% в 2022 году и на 40% в 2024. Согласно [25] генерация знаний – это научно-техническая деятель-

ность, представляющая процесс создания новых знаний путем переработки информации на основе общеизвестного знания.

В связи с этим *целью* экспериментального исследования, приведенного в работе, является генерация новых знаний *о качестве бетонных образцов* в условиях нового информационного поля, консолидирующего информацию о результатах натурных испытаний, и видеопотоки, которые получены в ходе активных лабораторных экспериментов-изучения.

В рамках работы под *качеством бетонных образцов* авторы подразумевают факт образования, динамику и уровень развития дефектов в виде нарушений сплошности поверхности бетонных образцов.

Для достижения цели авторами работы решены следующие задачи:

- 1) *организация активных лабораторных экспериментов-изучения* для определения значений минимальных разрушающих усилий и прочности бетона на сжатие для образцов кубической и призматической формы;
- 2) *организация непрерывного мониторинга* за проведением испытаний бетонных образцов с использованием средств видеонаблюдения и формирование видеопотоков при испытании каждого образца;
- 3) *формирование структуры информационного поля* испытаний для последующей консолидации данных, сочетающего прочностные характеристики материала и динамические характеристики (изменение сплошности во времени), сопровождающие разрушение образцов;
- 4) *визуальный анализ видеопотока* нагружения и разрушения бетонных образцов для выбора методов математического описания процесса формирования и развития трещин на бетонных образцах с начала их нагружения и до момента разрушения с использованием результатов обработки кадров видеопотока и экспертной оценки.

#### Методика экспериментального исследования

Для проведения испытаний изготавливались опытные образцы, в состав которых входили следующие материалы (**рис. 1**):

- портландцемент (цемент марки ПЦ 500-Д0, изготовленный на Магнитогорском цементно-огнеупорном заводе);
- щебень кубовидный марки М1400 и фракции 5–20 мм (место добычи Гумбейский гранитный карьер);
- песок мытый сеяный фракции 0–5 мм (место добычи Наровчатский песчаный карьер);
- модификатор бетона «Эмбэлит» 0–100;
- пластификатор «Зика вискокрит» СП 5–600;
- вода питьевая водопроводная по ГОСТ Р 51232-98 температурой 20–22°C.





Рис. 1. Вид материалов и изготовленных образцов: 1, 2 – модификатор бетона «Эмбэлит»; 3 – щебень; 4 – песок мытый; 5, 6 – портландцемент; 7 – вода питьевая с пластификатором  
Fig. 1. Materials and manufactured samples: 1, 2 is Embelit concrete modifier; 3 is gravel; 4 is washed sand; 5, 6 is Portland cement; 7 is drinking water with a plasticizer

Для подбора состава высокопрочного, самоуплотняющегося, напрягающего бетона выбрано четыре варьируемых показателя: масса цемента, водоцементное отношение, отношение массы пластификатора к массе цемента, отношение массы модификатора к массе цемента. Также определены два неизменяемых материала: масса песка; масса щебня. Уровни варьирования показателей представлены в **табл. 1**.

Лабораторные образцы представлены двумя видами: образец-куб с размерами 100×100×100 мм по ГОСТ 10180-2012; образец-призма с размерами 100×100×400 мм по ГОСТ 10180-2012. Для каждого вида образцов изготавливалось три серии. В каждой серии насчитывалось по 12 образцов-кубов и по 3 образца-призмы.

Заливка образцов-кубов и образцов-призм производилась из одной партии бетона. Их испытания проводились в один день. В указанных условиях возраст бетона и его прочностные показатели условно одинаковы для оценки механизма разрушения контрольных образцов под нагрузкой.

Для проведения испытаний образцы устанавливались на нижнюю опорную плиту пресса по центру продольной оси. После установки образца на нижнюю опорную плиту испытательной машины выполнялось совмещение верхней плиты испытательной машины с верхней опорной гранью образца так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Для устранения влияния концентрации напряжений на границах соприкосновения образцов с верхней и нижней плитами испытательной машины использовались компенсирующие прокладки (**рис. 2**). Образец нагружался до разрушения при постоянной скорости нарастания нагрузки ( $0,6 \pm 0,2$ ) МПа/с. На **рис. 2, а** введены обозначения: 1 – верхняя плита испытательной машины; 2 – нижняя плита испытательной машины; 3 – компенсирующие прокладки; 4 – образец; 5 – камера; 6 – поверхность образца, входящая в видеопоток; 7 – фон, входящий в кадры видеопотока; 8 – усилия, действующие на образец при центральном сжатии.

Таблица 1. Уровни варьирования показателей  
Table 1. Variability of indicators

№ п/п	Наименование варьируемого показателя	Обозначение	Уровень показателя		
			Максимальный	Нулевой	Минимальный
1	Масса цемента, кг на 1000 л	С	490	460	430
2	Водоцементное отношение	В/С	0,40	0,35	0,30
3	Отношение пластификатора к массе цемента	Р/С	0,030	0,022	0,014
4	Отношение модификатора к массе цемента	М/С	0,25	0,2	0,15

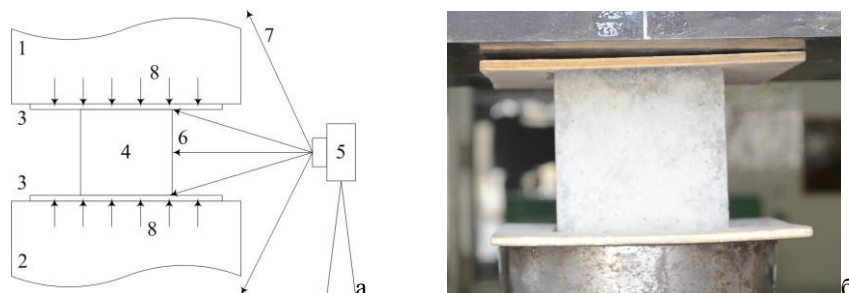


Рис. 2. Установка образца для испытания: а – схема; б – натурный образец  
Fig. 2. Setting the test sample: а is a diagram; б is a full-scale sample

Проведение испытаний образцов проводилось согласно плану, приведенному в табл. 2.

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента  
Table 2. Experiment planning matrix

Номер состава	Уровень показателя			
	С	W/C	P/C	M/C
1	+	+	+	+
2	–	+	+	+
3	+	–	+	+
4	–	–	+	+
5	+	+	–	+
6	–	+	–	+
7	+	–	–	+
8	–	–	–	+
9	+	+	+	–
10	–	+	+	–
11	+	–	+	–
12	–	–	+	–
13	+	+	–	–
14	–	+	–	–
15	+	–	–	–
16	–	–	–	–

Примечание: «+» – уровень показателя максимальный; «–» – уровень показателя минимальный.

В ходе испытаний получены два вида данных: данные, характеризующие прочность контрольных образцов на осевое сжатие; видеопоток, который позволил зафиксировать момент зарождения трещин, динамику их развития вплоть до разрушения контрольных образцов.

### Результаты экспериментальных исследований

#### Структура информационного поля экспериментальных исследований

Использование в ходе экспериментов по исследованию прочности бетонных образцов средств видеозаписи позволило сформировать новую структуру информационного поля испытаний (рис. 3). Структура нового информацион-

ного поля испытаний включает три основных уровня (1, 2, 4) и один функциональный блок (3). Первый уровень предназначен для организации хранения данных, полученных в ходе проведения эксперимента, и их структурирования. Уровень анализа данных предполагает извлечение необходимой первичной информации, выполнение анализа данных на основе простых расчетов или подсчета с помощью традиционных методов и с использованием новых информационных технологий. Третий уровень предполагает генерацию новых знаний на основе консолидированных данных, которые ранее не рассматривались в традиционных нормативных документах. Например, оценка времени развития дефектов до достижения их критического развития.

Вопросы консолидации информации и алгоритма генерации новых знаний являются перспективным направлением работы, построенным на результатах экспериментальных исследований.

#### Методика и результаты оценки прочности бетонных образцов

По результатам планирования эксперимента подобран состав бетона, который приведен в табл. 3.

Таблица 3. Состав высокопрочного самоуплотняющегося напрягающего бетона класса В80

Table 3. Composition of high-strength self-compacting self-stressing concrete of B80 grade

№ п/п	Наименование компонента	Насыпная плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	Масса, кг на 1000 л
1	Цемент	3100	520
2	Эмбэлит	2200	104
3	«Зика вискокрит» СП 5-600	1100	8,32
4	Песок	2600	678,20
5	Щебень	2600	910,46
6	Вода	1000	166,4

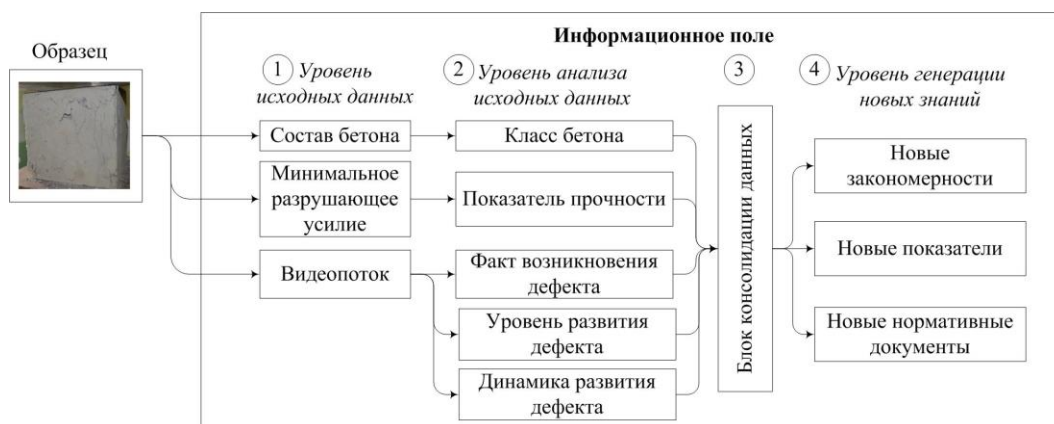


Рис. 3. Структура информационного поля испытаний бетонных образцов

Fig. 3. Information field of concrete sample tests

После испытания контрольных образцов-кубов получен состав бетона, обеспечивающий с вероятностью 0,95 класс бетона по прочности на осевое сжатие не ниже В80.

Показатель прочности бетона как количественной характеристики определялся согласно методике, приведенной в ГОСТ 10180-2012 [13]:

1) методом визуально-измерительного контроля определяются значения параметров качества образцов и фактическая площадь их поперечного сечения, мм<sup>2</sup>;

2) по результатам эксперимента определяется минимальное разрушающее усилие, кН;

3) определяется величина напряжения разрушения с точностью до 0,1 МПа (временное сопротивление образца осевому сжатию) согласно выражению

$$R = \alpha \frac{F}{A} K_w,$$

где  $F$  – минимальное разрушающее усилие, Н;  $A$  – площадь рабочего сечения образца, мм;  $\alpha$  – масштабный коэффициент для приведения прочности бетона к прочности бетона в образцах базовых размера и формы;  $K_w$  – поправочный коэффициент для ячеистого бетона, учитывающий влажность образцов в момент испытания (в наших испытаниях тяжелый бетон,  $K_w = 1$ ).

Результаты испытаний одной из серий годных по визуально-измерительному контролю образцов размером 100×100×100 мм при значении масштабного коэффициента 0,95 приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытания контрольных образцов-кубов по прочности на осевое сжатие

Table 4. Tests of cubic reference samples for axial compression

Показатель	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
Минимальное разрушающее усилие, кН	888,1	891,3	860,0	864,2	845,2	864,6
Прочность бетона на сжатие, МПа	84,4	84,7	81,7	82,1	80,3	82,1
Среднее значение прочности бетона на сжатие, МПа	82,5					
Класс бетона по прочности на осевое сжатие по ГОСТ 18105-2018	В80					

В ходе эксперимента производилось формирование видеопотока, который фиксировал динамику изменения сплошности образцов на его поверхности.

### Результаты визуального анализа видеопотока нагружения и разрушения бетонных образцов

Видеозапись экспериментов по нагружению образцов позволила выполнить изучение изменения сплошности поверхности после завершения стадии активного натурного эксперимента. На рис. 4 показаны фрагменты видеопотока, которые отображают ключевые переходные точки в динамике разрушения бетонного образца.

На рис. 4 выбраны и приведены состояния разрушения образца согласно экспертной оценке:

а – образец без дефектов в момент начала испытаний на центральное сжатие;

б – образец в начальной стадии механизма разрушения: 1, 2 – скалывание небольших участков поверхности бетона образца вследствие разрыва бетона в поперечном направлении; 3 – появление микроскопических и видимых трещин отрыва, направленных параллельно или с небольшим наклоном к направлению действия сжимающих сил;

в – образец на стадии прогрессирующего механизма разрушения: 4 – скалывание больших участков поверхности бетона образца вследствие разрыва бетона в поперечном направлении;

г – образец в дальнейшей стадии прогрессирующего механизма разрушения: 5, 6 – растущие, раскрывающиеся и соединяющиеся трещины;

д – образец в состоянии, предшествующем полному разрушению и максимальному раскрытию трещин: 7 – новые зарождающиеся видимые трещины; 8, 9 – прогрессирующие трещины; 9 – трещина с максимальным раскрытием;

е – образец после разрушения.

Множественные трещины образца с правой стороны являются предпосылками разрушения. Однако перед разрушением происходит заметное перераспределение напряжений в образце, следствием чего является появление трещины уже с левой стороны образца.

Изучение видеопотока позволило выявить новые знания по особенностям разрушения образца:

– процесс разрушения образцов во времени является нелинейным и носит лавинообразный характер в 15-процентном интервале времени полного испытания (рис. 5);

– центры начала разрушения на поверхности образца располагаются случайным образом, но впоследствии имеют направленное развитие вдоль усилия нагружения; наблюдается значительное цветовое отличие исходной поверхности образца и фрагментов разрушения;

– максимальную ширину раскрытия трещины приобретают в момент времени, соответствующий «взрывному» разрушению образцов, и при органолептическом контроле не поддается непосредственному измерению.



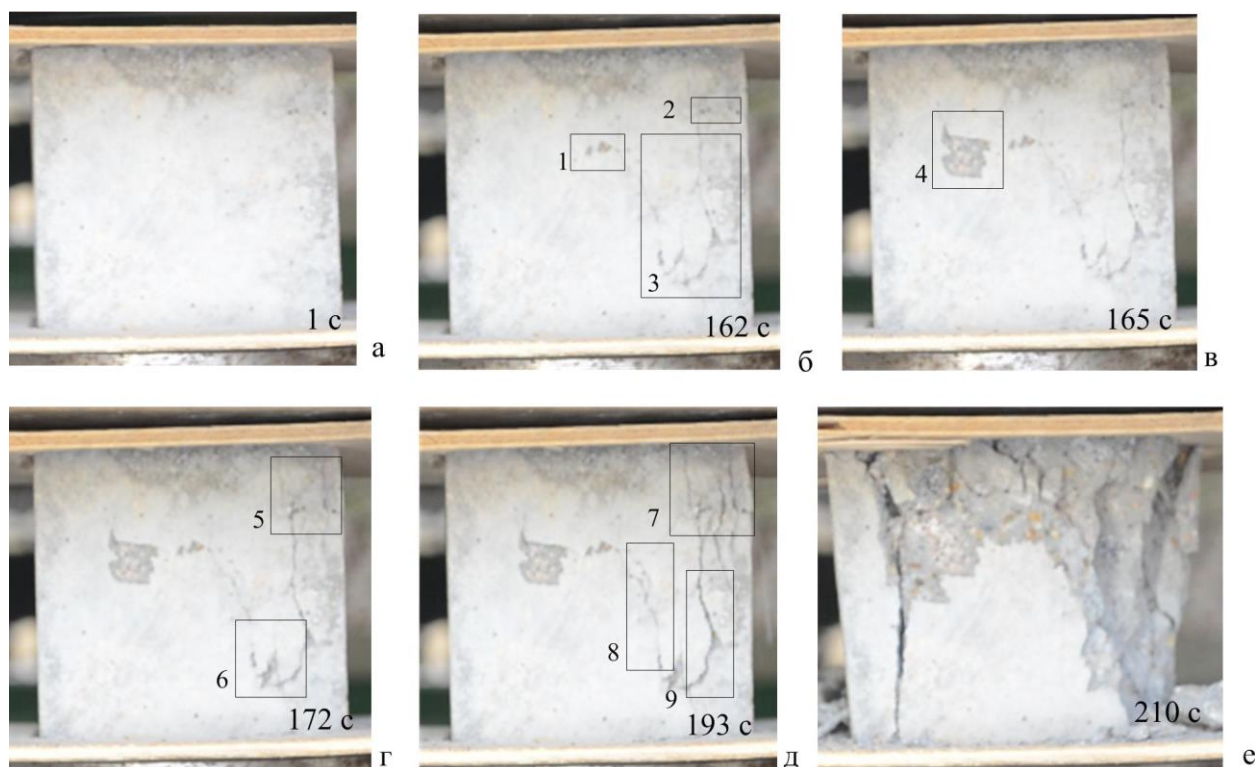


Рис. 4. Фрагменты видеопотока с ключевыми переходами разрушения  
Fig. 4. Fragments of a video stream, including key transitions of fracture

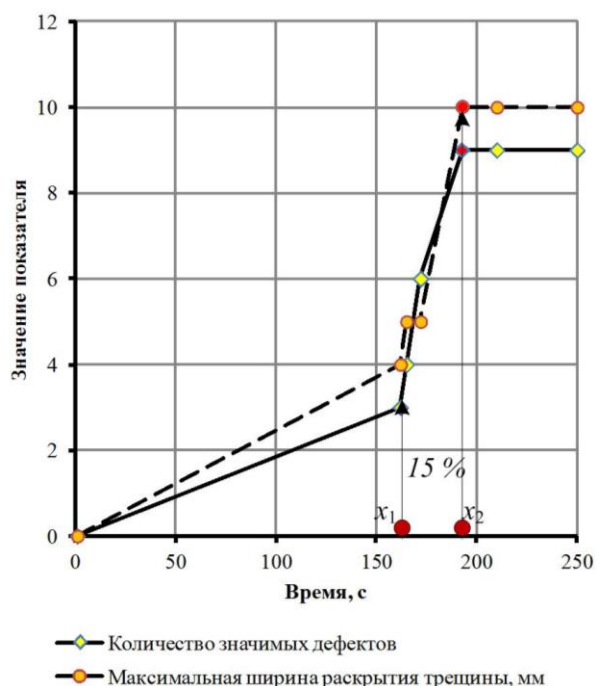


Рис. 5. Графическое отделение интервала времени активного разрушения образцов:  
 $x_1$  – время начала разрушения;  $x_2$  – время полного разрушения

Fig. 5. Graphical separation of a time interval of active sample fracture:  $x_1$  is time of starting fracture;  $x_2$  is time of complete fracture

Алгоритмы пороговой обработки изображения позволяют определить границы образца и формирования трещин даже при низкой контрастности кадров видеопотока, а также сопоставить изображения реального мира с постобработанными кадрами. На **рис. 6** представлены примеры сопоставления кадров видеопотока с низкой контрастностью и результатами пороговой обработки кадров.

Авторами исследования проведена серия вычислительных экспериментов для проверки работы алгоритмов выделения на изображениях значимых элементов разрушения при пороговой фильтрации и выделения границ по алгоритму Кенни\*. На **рис. 7** приведен один из примеров изображений при сравнительном анализе и определении адекватности работы этих алгоритмов.

Сравнительный анализ исходных изображений и его цифрового следа визуальным способом не выявил артефактов, нарушающих общую картину разрушения.

\* Оператор Кэнни (детектор границ Кэнни, алгоритм Кэнни) в дисциплине компьютерного зрения – оператор обнаружения границ изображения, является многоступенчатым, используется для широкого спектра границ.



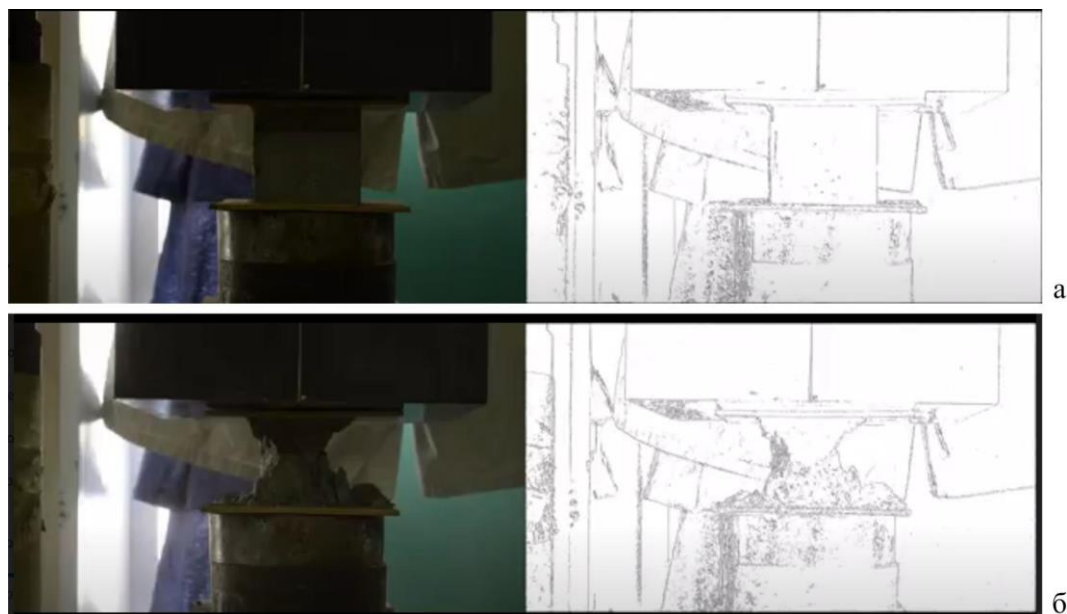


Рис. 6. Фрагмент видеопотока при изучении формы образцов  
Fig. 6. Fragment of a video stream, when studying a shape of the samples

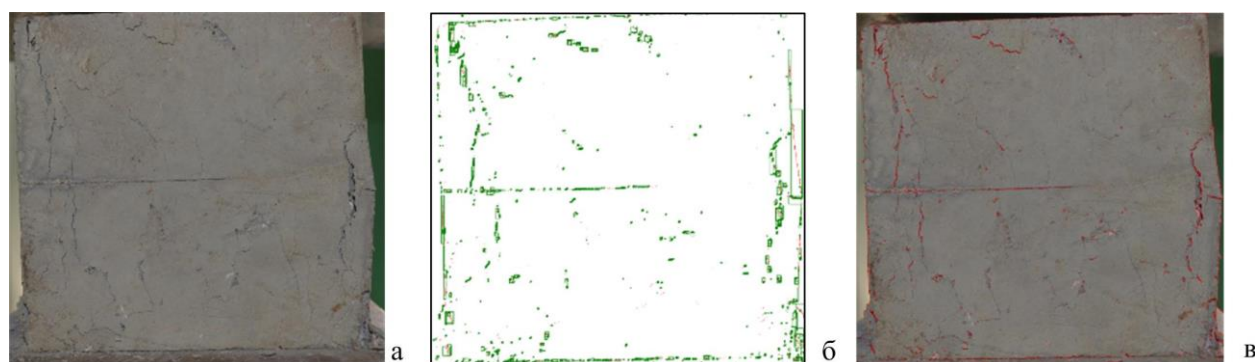


Рис. 7. Примеры изображений при сравнительном анализе: а – исходный кадр изображения; б – цифровой след после обработки изображений; в – результат сопоставления исходного кадра и цифрового следа  
Fig. 7. Examples of images during a comparative analysis: a is a source frame of the image; б is a digital footprint after processing images; в is matching the source frame and the digital footprint

### Закключение

1. Анализ теоретических и практических работ в области разрушающих испытаний бетонных образцов, характеризующих их качество, показал высокую степень изученности с точек зрения вычисления напряженно-деформированного состояния образцов, прогнозирования сроков службы железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях климатических воздействий и агрессивной среды; разработка способов и устройств для проведения лабораторных испытаний при изучении свойств бетонных образцов; подбор добавок в состав бетона для изменения его структуры и прочностных свойств; развитие методов разрушающего и неразрушающего контроля при исследовании образцов. Все рассматриваемые

работы не используют возможности новых информационных технологий для системного извлечения новых знаний о процессе появления и развития дефектов в виде нарушений сплошности на поверхности образцов.

2. Испытания бетонных образцов двух видов (куб и призма) проведены по традиционной методике для выявления прочностных характеристик, характеризующих их качество, в условиях непрерывного мониторинга за их разрушением на основе формирования видеопотока.

3. Наличие видеопотока по результатам проведения экспериментального исследования позволило сформировать структуру нового информационного поля, включающего традиционные блоки информации о качественных характеристиках бетонных образцов и отличающееся

наличием информационного блока с результатами непрерывного мониторинга за экспериментом, позволяющего генерировать новые знания о динамике формирования и развития дефектов в виде нарушений сплошности на поверхности образцов.

4. Консолидация традиционных технологий проведения испытаний бетонных образцов и формирование нового информационного поля является экспериментальной основой для синтеза систем предикативной аналитики при создании и анализе прочностных свойств новых материалов, а также изменения нормативной базы по оценке их качества.

5. Перспективными направлениями развития работы является использование полученного информационного поля для синтеза автоматизированной системы, позволяющей выполнять анализ консолидированной информации и прогнозирование показателей качества готовой продукции: материалов изделий и конструкций.

#### Список литературы

1. Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах / М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко, О.С. Логунова и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 103–111. DOI: 0.18503/1995-2732-2021-19-2-103-111.
2. Jevtic R.B. Safety in residential buildings evacuation from residential buildings without fire escape stairs // Military Technical Courier. 2021. Т. 69. №1. С. 148–178.
3. Щербина В.И. Разработка комплекса межгосударственных стандартов по функциональной безопасности систем, связанных с безопасностью зданий и сооружений // ИТ-стандарт. 2017. № 1 (10). С. 1–5.
4. Логунова О.С., Павлов В.В., Нуров Х.Х. Оценка статистическими методами серного отпечатка поперечного темплета непрерывнолитой заготовки // Электрометаллургия. 2004. № 5. С. 18–24.
5. Tutarova V.D., Logunova O.S. Analysis of the surface temperature of continuously cast ingot beyond the zones of air cooling // Stal. 1998. № 8. С. 21–23.
6. Логунова О.С., Аркулис М.Б. Особенности научного эксперимента: понятие, классификация и назначение // Современные достижения университетских научных школ: сб. докладов национальной научной школы-конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 78–85.
7. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. М.: СИНТЕГ, 2007. 668 с.
8. Логунова О.С., Романов П.Ю., Ильина Е.А. Обработка экспериментальных данных на ЭВМ: учебник. Сер. Высшее образование: Аспирантура. 2-е изд., испр. и доп. М.: Информа-М, 2021. 377 с.
9. Моргунов А.П., Ревина И.В. Планирование и анализ результатов эксперимента: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 344 с.
10. Синозерский А.Н., Мухтаров Р.А. Определение НДС при разрушении внецентренно сжимаемых со стандартной скоростью призм из мелкозернистого бетона по результатам испытаний // Строительная механика и конструкции. 2013. № 2 (7). С. 56–62.
11. Результаты натурных испытаний составов мелкозернистых бетонов / Д.А. Артамонов, Т.А. Низина, Д.И. Коровкин и др. // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2015. № 6 (14). С. 75–80.
12. Пат. RU 2582277 Российская Федерация, МПК С1. Способ испытания прочности бетона монолитных строительных конструкций и анкерное приспособление для испытания прочности бетона монолитных строительных конструкций/ В.В. Мартос; заявитель и патентообладатель ФГОБУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет». № 2015108993/15; заявл. 13.03.2015; опубл. 20.04.2016.
13. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Госстандарт, 2012. 34 с.
14. Курбатов В.Л., Середа О.А., Пастухов С.В. Анализ существующих методик дилатометрических испытаний бетонов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2009. № 1. С. 97–100.
15. Пат. RU 145755 Российская Федерация, МПК U1. Камера для испытаний бетона и других твердых материалов на морозостойкость / Л.М. Клячко, В.Л. Уманский, Б.А. Макаров, А.С. Кротов, И.В. Яковлев, М.Н. Киселев; заявитель и патентообладатель ООО «Центральный научно-исследовательский институт «Курс». № 2014109452/28; заявл. 13.03.2014; опубл. 27.09.2014.
16. Пат. RU 2212663 Российская Федерация, МПК С2. Устройство для испытания бетонов / В.В. Гулунов, А.А. Пау, А.В. Гулунов, Г.Б. Гершкович; заявитель и патентообладатель ООО СКБ «Стройприбор». № 2001131032/03; заявл. 16.11.2001; опубл. 20.09.2003.
17. Пат. RU 2402008 Российская Федерация, МПК С1. Способ испытания дисперсно-армированных бетонов на растяжение / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет». № 2009145375/28; заявл. 07.12.2009; опубл. 20.10.2010.
18. Пат. RU 2271528 Российская Федерация, МПК С1. Способ испытания на прочность бетона строительных конструкций, устройство для расточки профильной канавки, анкерное приспособление для испытания бетона строительных конструкций, силовое устройство для испытания бетона строительных конструкций, кондуктор для сверления отверстий / Б.А. Мельников, В.А. Чебыкин, Г.А. Губайдуллин; заявитель и патентообладатель

- ООО НПП «Спектр-Конверсия»; ООО НПП «ИНТЕРПРИБОР». № 2004122261/28; заявл. 09.07.2004; опубл. 10.03.2006.
19. Потапов В.В., Горев Д.С. Результаты испытаний экспериментальных составов мелкозернистого бетона с добавлением нанокремнезема и микрокремнезема // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3–2. С. 232–238.
  20. Чернякевич В.И., Пушкаренко Н.Н. Планирование эксперимента при оптимизации состава мелкозернистого цементного бетона для плит сборного покрытия лесных дорог // Лесной вестник (1997–2002). 2000. № 1. С. 105–110.
  21. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Комбинирование неразрушающих методов испытания бетона // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2017. № 1 (103). С. 87–92.
  22. Горбунов И.А., Васильков В.Э. Прочность бетона на сжатие с позиции механики разрушения // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2006. № 3. С. 51–54.
  23. Ли Ч.С. Исследование применения механики разрушения к бетонным конструкциям // Труды Дальневосточного государственного технического университета. 2004. № 137. С. 154–156.
  24. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., Латыш А.В. Мониторинг возводимых железобетонных конструкций на основе неразрушающих испытаний прочностных параметров бетона // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 1 (85). С. 102–106.
  25. Задумкин К.А., Кондаков И.А., Иванов М.Н. Процесс генерации знаний: основные понятия и сущность // Экономика региона: проблемы и перспективы развития. 2010. Вып. 4 (50). С. 23–30.
  6. Logunova O.S., Arkulis M.B. Features of a scientific experiment: concept, classification and purpose. *Sovremennye dostizheniya universitetskikh nauchnykh shkol: sb. dokladov natsionalnoy nauchnoy shkoly-konferentsii* [Current achievement of the university scientific schools: collection of reports of the national scientific school-conference]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2019, pp. 78–85. (In Russ.)
  7. Novikov A.M., Novikov D.A. *Metodologiya* [Methodology]. Moscow: SINTEG, 2007, 668 p. (In Russ.)
  8. Logunova O.S., Romanov P.Yu., Ilina E.A. *Obrabotka eksperimentalnykh dannykh na EVM: uchebnik* [Processing experimental data on a computer: Textbook]. Series: Higher education: Postgraduate studies (second edition revised and extended). Moscow: Inform-M, 2021, 337 p. (In Russ.)
  9. Morgunov A.P., Revina I.V. *Planirovanie i analiz rezultatov eksperimenta: ucheb. posobie* [Planning and analyzing experimental results: a tutorial]. Omsk: Publishing House of OmSTU, 2014, 344 p. (In Russ.)
  10. Sinozerskiy A.N., Mukhtarov R.A. Determining a strain and stress state at the destruction of prisms made of fine-grained concrete eccentrically compressed at standard speed by test results. *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii* [Building Mechanics and Structures], 2013, no. 2 (7), pp. 56–62. (In Russ.)
  11. Artamonov D.A., Nizina T.A., Korovkin D.I. et al. Results of full-scale tests of fine-grained concrete compositions. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitelstve* [Technical Regulation in Transport Construction], 2015, no. 6 (14), pp. 75–80. (In Russ.)
  12. Martos V.V. *Sposob ispytaniya prochnosti betona monolitnykh stroitelnykh konstruksiy i ankernoe prispособlenie dlya ispytaniya prochnosti betona monolitnykh stroitelnykh konstruksiy* [Method of testing strength of concrete in monolithic building structures and an anchor device for testing strength of concrete in monolithic building structures]. Patent RF, no. 2582277, 2016.
  13. GOST 10180-2012. Concrete. Methods for determining strength using reference specimens. Moscow: Gosstandart, 2012, 34 p. (In Russ.)
  14. Kurbatov V.L., Sereda O.A., Pastukhov S.V. Analysis of existing methods of dilatometric testing of concrete. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Shukhov Belgorod State Technological University], 2009, no. 1, pp. 97–100. (In Russ.)
  15. Klyachko L.M., Umansky V.L., Makarov B.A., Krotov A.S., Yakovlev I.V., Kiselev M.N. *Kamera dlya ispytaniy betona i drugikh tverdykh materialov*

## References

1. Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Logunova O.S. et al. Analysis of efficiency of the existing system for assessing the quality of materials, products and structures at hazardous production facilities. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 103–111. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-103-111.
2. Jevtic R.B. Safety in residential buildings: evacuation from residential buildings without fire escape stairs. *Military Technical Courier*, 2021, vol. 69, no. 1, pp. 148–178.
3. Shcherbina V.I. Development of a set of interstate standards for functional safety of systems related to safety of buildings and structures. *IT-standart* [IT-Standard], 2017, no. 1 (10), pp. 1–5. (In Russ.)
4. Logunova O.S., Pavlov V.V., Nurov Kh.Kh. Statistical evaluation of the sulfur print of the transverse template of the continuously cast billet. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2004, no. 5, pp. 18–24. (In Russ.)
5. Tutarova V.D., Logunova O.S. Analysis of the



- na morozostoykost [Chamber for testing concrete and other hard materials for frost resistance]. Patent RF, no. 145755, 2014.
16. Gulunov V.V., Pau A.A., Gulunov A.V., Gershkovich G.B. *Ustroystvo dlya ispytaniya betonov* [Device for testing concrete]. Patent RF, no. 2212663, 2003.
  17. Chernousov N.N., Chernousov R.N. *Sposob ispytaniya dispersno-armirovannykh betonov na rastyazhenie* [Method of tensile testing of fiber-reinforced concrete]. Patent RF, no. 2402008, 2010.
  18. Melnikov B.A., Chebykin V.A., Gubaidullin G.A. *Sposob ispytaniya na prochnost betona stroitelnykh konstruktsey, ustroystvo dlya rastochki profilnoy kanavki, ankernoe prispособlenie dlya ispytaniya betona stroitelnykh konstruktsey, silovoe ustroystvo dlya ispytaniya betona stroitelnykh konstruktsey, konduktor dlya sverleniya otverstiy* [Method of testing strength of concrete of building structures, a device for boring a profile groove, an anchor device for testing concrete of building structures, a power device for testing concrete of building structures, a jig for drilling holes]. Patent RF, no. 2271528, 2006.
  19. Potapov V.V., Gorev D.S. Results of testing experimental compositions of fine-grained concrete with added nanosilica and microsilica. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern Science-Intensive Technologies], 2019, no. 3–2, pp. 232–238. (In Russ.)
  20. Chernyakevich V.I., Pushkarenko N.N. Planning an experiment to optimize the composition of fine-grained cement concrete for precast slabs of forest roads. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2000, no. 1, pp. 105–110. (In Russ.)
  21. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Combination of non-destructive testing methods for concrete. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitelstvo i arkhitektura* [Bulletin of Brest State Technical University. Construction and Architecture], 2017, no. 1 (103), pp. 87–92. (In Russ.)
  22. Gorbunov I.A., Vasilkov V.E. Compressive strength of concrete from the point of view of fracture mechanics. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering and Automation Problems], 2006, no. 3, pp. 51–54. (In Russ.)
  23. Li Ch.S. Study on the application of fracture mechanics to concrete structures. *Trudy Dalnevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Far Eastern State Technical University], 2004, no. 137, pp. 154–156. (In Russ.)
  24. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N., Latysh A.V. Monitoring of reinforced concrete structures under construction using non-destructive tests of concrete strength parameters. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitelstvo i arkhitektura* [Bulletin of Brest State Technical University. Construction and Architecture], 2014, no. 1 (85), pp. 102–106. (In Russ.)
  25. Zadumkin K.A., Kondakov I.A., Ivanov M.N. The process of generating knowledge: basic concepts and essence. *Ekonomika regiona: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the Region: Problems and Prospects of Development], 2010, no. 4 (50), pp. 23–30. (In Russ.)

Поступила 02.08.2021; принята к публикации 27.08.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 02/08/2021; revised 27/08/2021; published 27/09/2021

**Наркевич Михаил Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования зданий и строительных конструкций, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: narkevich\_mu@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

**Логунова Оксана Сергеевна** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

**Корниенко Владимир Дмитриевич** – эксперт в области промышленной безопасности по зданиям и сооружениям 1-й категории, ведущий инженер в области экспертизы промышленной безопасности научно-исследовательского института промышленной безопасности Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: volodya.kornienko2319@yandex.ru

**Николаев Антон Андреевич** – обучающийся, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: aantoni2001@gmail.com. ORCID 0000-0003-4254-6813

**Тюлюмов Александр Николаевич** – обучающийся, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: tulumov.a@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3988-845X

**Злыдарев Никита Витальевич** – обучающийся, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: nekit777.net@gmail.com. ORCID 0000-0002-3511-4775



**Дерябин Денис Исакович** – студент, кафедра проектирования зданий и строительных конструкций, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: shalender@mail.ru

**Mikhail Yu. Narkevich** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Design of Buildings and Building Structures, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: narkevich\_mu@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

**Oksana S. Logunova** – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Computer Science and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

**Vladimir D. Kornienko** – Category 1 Expert on Industrial Safety for Buildings and Structures, Lead Engineer in the field of examination of industrial safety, Research Institute of Industrial Safety, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: volodya.kornienko2319@yandex.ru

**Anton A. Nikolaev** – student, Department of Computer Science and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: aantont2001@gmail.com. ORCID 0000-0003-4254-6813

**Aleksandr N. Tyulyumov** – student, Department of Computer Science and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: tulumov.a@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3988-845X

**Nikita V. Zlydarev** – student, Department of Computer Science and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: nekit777.net@gmail.com. ORCID 0000-0002-3511-4775

**Denis I. Deryabin** – student, Department of Design of Buildings and Building Structures, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: shalender@mail.ru

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.783  
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-102-108



### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Левыкина А.Г., Горбунов К.С., Позднякова А.И., Соловьев В.Н.

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

**Аннотация.** В процессе горячей прокатки важным фактором является тепловое состояние металла в линии стана. Разработка рациональных температурно-скоростных режимов нагрева слэбов и производства полос требует проведения большого количества экспериментов, времени и затрат. В связи с чем для решения задач, направленных на получение готовых изделий с заданным набором свойств, необходим современный подход в проведении исследований. Одним из таких методов является совместное использование физического и математического моделирования. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса нагрева металла образцов, изготовленных из слэбов текущего производства, с целью уточнения теплофизических коэффициентов стали 17ГС. Нагрев производили в муфельной печи ступенчато с выдержкой для достижения однородной температуры по объему образца, в результате были получены графики зависимости температуры по времени. На основании результатов физического моделирования в программном комплексе «Deform 3D» разработана математическая модель нагрева металла, повторяющая лабораторные исследования, с целью проверки адекватности модели. Используя полученные результаты исследований, проведено моделирование теплового состояния металла в линии стана горячей прокатки. Моделирование осуществляли в два этапа: первый – нагрев слэба перед горячей прокаткой, второй – горячая прокатка в черновой группе клетей. Сравнение поверхностных температур, полученных при моделировании, с показаниями пирометра за 5-й клетью показала разницу, не превышающую 15°C, что свидетельствует об адекватности модели. Разработанная математическая модель адекватна и может быть использована для моделирования теплового состояния металла при формировании неоднородности свойств на длинномерных изделиях.

**Ключевые слова:** лабораторные исследования, математическое моделирование, нагрев, прокатка, тепловое состояние, Deform 3D.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90232.*

© Левыкина А.Г., Горбунов К.С., Позднякова А.И., Соловьев В.Н., 2021

#### Для цитирования

Исследование теплового состояния металла с использованием методов физического и математического моделирования / Левыкина А.Г., Горбунов К.С., Позднякова А.И., Соловьев В.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 102–108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-102-108>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## STUDY ON A THERMAL STATE OF STEEL USING METHODS OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING

Levykina A.G., Gorbunov K.S., Pozdnyakova A.I., Solovyov V.N.

Lipetsk state technical university, Lipetsk, Russia

**Abstract.** An important factor of a hot rolling process is a thermal state of steel in the mill line. The development of feasible temperature and speed schedules for heating slabs and producing strips requires a large number of experiments, time and costs. Therefore, to solve problems aimed at manufacturing finished products with a given set of properties, we need to apply a modern approach to carrying out research. One of these methods is a combined use of physical and mathematical modeling. This paper presents the results of experimental studies on a heating process of steel samples made from slabs of current production in order to specify thermophysical coefficients of steel grade 17GS. The samples were stepwise heated in a muffle furnace and soaked to achieve a uniform temperature over the sample volume; as a result, the authors obtained time-temperature curves. Physical modeling in DEFORM-3D was used to develop a mathematical model of heating steel, repeating laboratory research, in order to check adequacy of the model. Using the research results, the authors simulated the thermal state of steel in the hot rolling mill line. The simulation was carried out in two stages: the first one was heating a slab before hot rolling; the second one was hot rolling in roughing stands. The surface temperatures obtained during the simulation and compared with the readings of a pyrometer after the 5th stand showed a difference not exceeding 15°C, which indicated adequacy of the model. The developed mathematical model is adequate and can be used to simulate the thermal state of steel during the formation of non-uniform properties of long products.

**Keywords:** laboratory research, mathematic modeling, heating, rolling, thermal state, DEFORM-3D.

*The reported study was funded by RFBR according to research project No. 20-38-90232.*

### For citation

Levykina A.G., Gorbunov K.S., Pozdnyakova A.I., Solovyov V.N. Study on a Thermal State of Steel Using Methods of Physical and Mathematical Modeling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 102–108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-102-108>

### Введение

Конечные свойства и структура проката определяются тепловым состоянием металла на всех этапах его производства. В процессе горячей прокатки на НШСГП важными факторами являются температурный режим нагрева слабов и прокатки полос [1, 2]. Нагрев слабов с контролем внутренних тепловых напряжений позволяет исключить образование дефектов. В свою очередь, изменяя температурный режим прокатки, можно оказывать влияние на формирование механических свойств проката [3–5].

Разработка рациональных температурно-скоростных режимов нагрева слабов и производства полос на станах горячей прокатки требует проведения большого количества экспериментов, времени и затрат [6, 7]. Существенно сократить эти затраты позволяет использование математических моделей. В настоящее время для моделирования процесса прокатки широко применяются различные программные пакеты, позволяющие прогнозировать технологию производства листа [8–10], начиная загрузкой металла в

методическую печь и заканчивая выпуском готовой продукции. Однако изучение конкретного технологического процесса, а зачастую конкретного материала требует дополнительных данных. В связи с чем приходится использовать сведения из различных источников либо использовать материалы, близкие по химическому составу, что может сказаться на точности разработанной модели.

Для решения задач, направленных на получение готовых изделий с заданным набором свойств, необходим современный подход в проведении исследований. Это особенно важно при прогнозировании формирования неоднородности металла на длинномерных изделиях. Одним из таких методов является совместное использование физического и математического моделирования.

Целью данной работы является разработка тепловой математической модели на основании результатов лабораторных экспериментов и исследования с ее помощью теплового состояния металла в линии непрерывного широкополосного стана горячей прокатки.

### Проведение исследований с помощью физического моделирования

Для экспериментального исследования процесса нагрева металла с целью уточнения теплофизических характеристик стали 17ГС, химический состав которой представлен в табл. 1, были отобраны темплеты и изготовлены из них образцы размером 50×70×70 мм. В образцах засверлены отверстия диаметром 5 мм для размещения термопар (рис. 1).

Таблица 1. Химический состав стали марки 17ГС, %  
Table 1. The chemical composition of steel grade 17GS, wt %

C	Si	Mn	S	P	N	Al	Cr	Ni	Cu	N
0,18	0,17	1,35	0,005	0,007	0,005	0,054	0,02	0,01	0,02	0,005

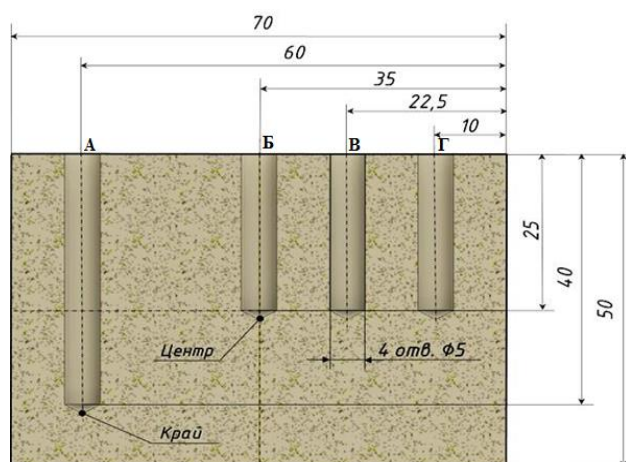


Рис.1. Схема расположения термопар в образце  
Fig. 1. Location of thermoelements in the sample

Образцы нагревались в муфельной печи. Загрузочное окно печи в период нагрева и охлаждения закрывалось шамотным кирпичом, щели заделывались каолиновой ватой. Образец в печи размещали на керамическую подкладку, чтобы исключить контакт нижней термопары с подом печи.

Для измерения температуры металла по сечению образца и температуры в печи использовали термопреобразователи (далее – термопары), две из которых зачеканили в отверстия А и Б (см. рис. 1) для обеспечения контакта спая с металлом, а две другие термопары для измерения температуры печного пространства располагались сверху и снизу образца, не касаясь подины. Результаты изменения температуры в печи и в самом образце регистрировали с помощью 4-канального измерителя-регулятора ELHART ECD4-L, запись температур во время исследования проводилась с частотой 0,1 с.

Нагрев проводился ступенчато: первая ступень – 400°C, вторая – 900°C, третья – 1150°C. Образец помещали в печь при температуре 400°C. На каждой ступени нагрева проводилась выдержка, достижение однородной температуры между центром образца и его поверхностью определяли по показаниям средней и верхней термопар. После нагрева и выдержки при 1150°C образец охлаждался вместе с печью до комнатной температуры. Результаты экспериментального нагрева представлены на рис. 2.

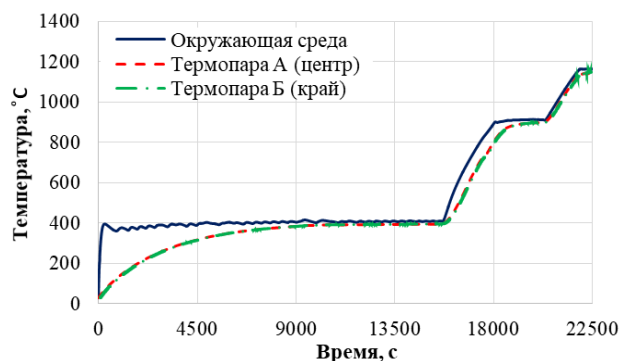


Рис. 2. Результаты экспериментального нагрева образца из стали 17ГС

Fig. 2. Experimental heating of the sample of 17GS steel

### Проведение исследований с помощью математического моделирования

На основании результатов физического моделирования была разработана математическая модель в программном комплексе «Deform 3D», повторяющая нагрев металла в печи с целью проверки адекватности модели. Температура окружающей среды задавалась по показаниям нижней и верхней термопар, фиксирующих температуру в пространстве печи. Теплофизические коэффициенты для стали 17ГС были заданы на основании имеющихся в открытых источниках данных [11, 12]. Коэффициент теплоотдачи и степени черноты приняты 10 Вт/м<sup>2</sup>·К и 0,8 соответственно.

Сравнение лабораторных исследований и моделирования осуществлялось на основании показаний температур центральной термопары. Различие значений составило более 50°C, что нецелесообразно для моделирования процесса горячей прокатки. Для корректировки модели нагрева был проведен подбор коэффициента теплоотдачи и степени черноты. По результатам натурных исследований коэффициент теплоотдачи составляет 49,5 Вт/м<sup>2</sup>·К и степени черноты – 0,79; расхождение температур не превышает 10°C, что свидетельствует об адекватности разработанной модели (рис. 3).



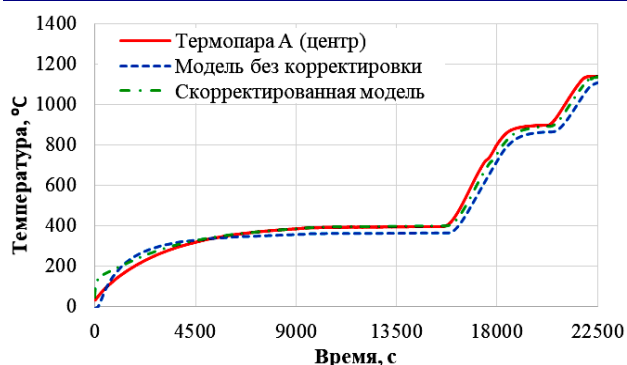


Рис. 3. Сравнение результатов физического и математического моделирования  
Fig. 3. Comparison of the results of physical and mathematical modeling

### Использование разработанной модели в решении практических задач

С использованием скорректированных данных, полученных в результате натурных исследований, проведено математическое моделирование теплового состояния металла в линии НШСГП для стали марки 17ГС. Моделирование производилось в два этапа: 1 – нагрев сляба в методической нагревательной печи; 2 – горячая прокатка в черновой группе клетей.

Моделирование нагрева осуществлялось в методической печи с шагающим балками [2] с переменным темпом нагрева. Средняя температура металла и время нахождения сляба в кон-

кретной зоне составляют: в зоне I – 960°C и 4440 с, в зоне II – 1230°C и 2460 с, в зоне III – 1320°C и 2220 с, в зоне IV – 1320°C и 1500 с и в зоне V – 1290°C и 1560 с соответственно. Общее время нагрева принято равным 12180 с (3 ч 22 мин). Температура посяда сляба в печь однородна и принята равной 38°C. Габаритные размеры сляба составляют 250×1090×10400 мм. Однако, учитывая геометрическую симметричность и однородность граничных условий, для уменьшения времени расчета моделировали ¼ часть исходной заготовки с размерами 250×545×5200 мм.

Результаты расчёта нагрева металла представлены на **рис. 4**. Расхождение между результатами моделирования и промышленными данными не превышает 15°C.

Математическое моделирование теплового состояния металла в линии стана горячей прокатки производили с помощью модуля «Shape rolling» и решателя «ALE rolling» программного комплекса «Deform 3D», которые позволяют рассматривать прокатку как установившийся процесс, не учитывая подстуживание концевых участков, уменьшая при этом время на расчет технологического процесса. Состав оборудования, принятый при моделировании, соответствует стану горячей прокатки 2000 ПАО «НЛМК» [13]. Расчет температурных параметров производили по режимам, представленным в **табл. 2**, с применением реверсивной прокатки в 1-й клетке черновой группы.

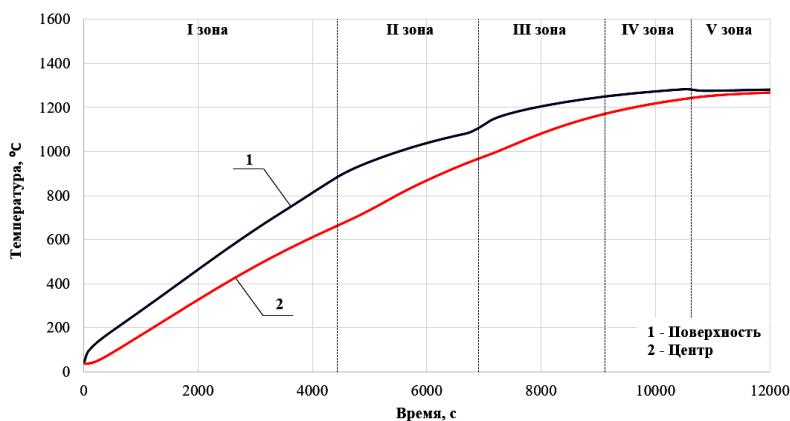


Рис. 4. Изменение температуры в контрольных точках сляба при нагреве в методической печи  
Fig. 4. Temperature change in the reference points of the slab during heating in a continuous slab heating furnace

Таблица 2. Параметры прокатки для черновой группы клетей для стали 17ГС

Table 2. The parameters of rolling in the roughing stands for steel grade 17GS

Номер клетки	1	1	1	2	3	4	5
$h_1$ , мм	215,0	179,2	147,1	117,0	85,3	60,2	44,7
$\varepsilon$ , %	14,00	16,65	17,91	20,46	27,09	29,43	25,75
$v$ , м/с	1,4	1,6	1,4	1,5	2,0	2,5	3,2
$T_{\text{вал}}$ , °C	90	90	90	90	85	85	80
$D_{\text{вал}}$ , мм	1400	1400	1400	1200	1200	1200	1200

Алгоритм моделирования процесса горячей прокатки в линии стана принят на основе разработанной модели, представленной в работе [14]. Толщина сляба на входе в 1-ю клеть составляет 250 мм. Так как в процессе моделирования не учитывали распределение температурного поля по длине исследуемого объекта, габаритные размеры исследуемого сляба были уменьшены и составляют 125×400×600 мм. Для моделирования процесса прокатки использовали кривые зависимости напряжения течения металла от истинной деформации, полученные при лабораторных испытаниях на плоскодеформированное сжатие на установке Gleeble 3800 в Ченстоховском политехническом университете в Польше для стали 17ГС [15].

Результаты расчета представлены графически на **рис. 5**. Сравнение результатов моделирования с промышленными данными по пирометру за 5-й клетью черновой группы показало расхождение температур, не превышающих 15°C, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования по нагреву металлического образца из стали 17ГС в муфельной печи, по результатам которых получены графики температур в контрольных точках образца.

Разработана математическая модель, повторяющая нагрев металла в печи с целью проверки адекватности модели. Произведено уточнение теплофизических параметров для стали 17ГС. Сравнение результатов лабораторных исследований и модели осуществлялось на основании показаний температур в центральной части об-

разца, расхождение не превышает 15°C.

На основании результатов физического и математического моделирования проведено исследование теплового состояния металла в линии непрерывного широкополосного стана горячей прокатки. Моделирование производилось в два этапа: 1 – нагрев сляба в методической нагревательной печи; 2 – горячая прокатка в черновой группе клетей. Сравнение результатов моделирования с промышленными данными по показаниям термопар показало расхождение температур не более 15°C, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Разработанная математическая модель адекватна и может быть использована для моделирования теплового состояния металла при формировании неоднородности свойств на длинномерных изделиях.

### Список литературы

1. Мухин Ю.А., Соловьев В.Н., Бобков Е.Б. Влияние деформационно-скоростного режима горячей прокатки в чистовой группе широкополосных станов на структуру стали марки Ст3 // Черные металлы. 2018. № 11 (1043). С. 12–15.
2. Дождиков В.И., Ганул А.О., Мордовкин Д.С. Оптимизация работы энерготехнологического комплекса нагрева металла перед прокаткой // Сталь. 2018. №2. С. 69–71.
3. Особенности температурного поля стальных полос при горячей прокатке / Мухин Ю.А., Бельский С.М., Чупров В.Б., Бахаев К.В., Стоякин А.О. // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. №6. С. 417–421.
4. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические предложения). Днепропетровск: РВА «Дніпро-VAL», 2010. 493 с.

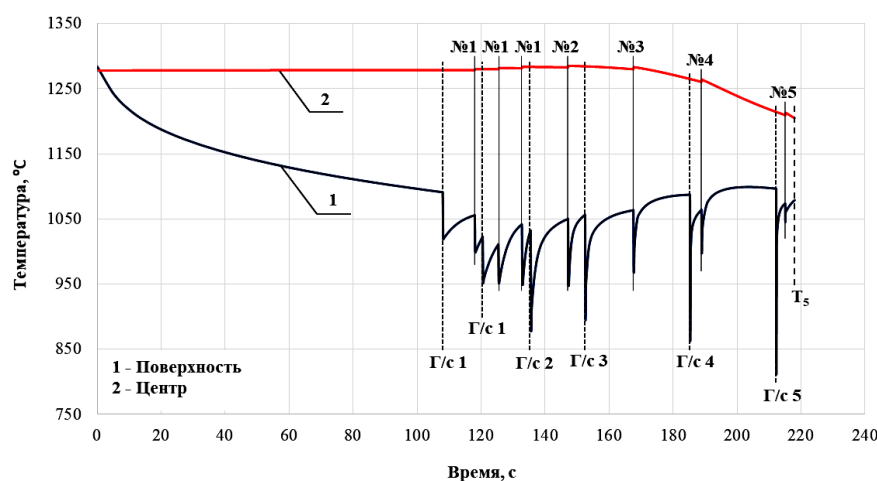


Рис. 5. График изменения температур в контрольных точках сляба при прокатке в черновой группе клетей  
Fig. 5. Curve of temperature changes in the reference points of the slab during rolling in the roughing stands

5. Соловьев В.Н., Бобков Е.Б. Температурный режим, повышающий производительность широкополосного стана горячей прокатки при производстве малоуглеродистых сталей // Черные металлы. 2020. № 8. С. 15–19.
6. Левандовский С.А., Кинзин Д.И., Саранча С.Ю. К вопросу моделирования процессов ОМД: методы оптимизации программного обеспечения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 75-й международной научно-технической конференции. Том 1. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. С. 76–79.
7. Кальченко А.А., Пашченко К.Г. Моделирование процессов ОМД с использованием современных программных продуктов: учебное пособие. Магнитогорск, 2017.
8. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Численное моделирование процесса деформации слэба с разной величиной обжатия в вертикальных валках черновой группы стана 2000 // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. 77(6). С. 675–681.
9. Поляков А.В., Шатшу Нетштутзим Р., Мазур И.П. Влияние технологических параметров прокатки в универсальных клетях на процесс смещения металла от кромок к продольной оси раската. Сообщение 1. Технологические параметры // Черные металлы. 2020. № 8. С. 20–24.
10. Поляков А.В., Шатшу Нетштутзим Р., Мазур И.П. Влияние технологических параметров прокатки в универсальных клетях на процесс смещения металла от кромок к продольной оси раската. Сообщение 2. Критическая точка // Черные металлы. 2020. № 9. С. 45–48.
11. Klimes L., Stetina J., Parilak L., Bucek P. Study of thermal behavior of continuously cast billets // Engineering MECHANICS, vol. 20, 2013, no. 3/4, pp. 237–246 (in English).
12. Markowski J., Knapinski M., Koczurkiewicz B., Fraczek T. The physical modelling of the process of normalizing rolling of S355J2G3 a steel plates // The Metallurgist, 74 (6) (2007), pp. 296–300 (in English).
13. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. В 2-х кн. Кн. 1. Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.
14. Levykina A.G., Chabonenko A.A., Shkatov V.V., Mazur I.P. The study of the thermal state of the metal in the production of the hot rolled strips in «Deform 3D» // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1134 (1). P.1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012034\ (in English).
15. Mazur I., Levykina A., Laber K. The mathematical model of the thermal state of the metal in the hot rolling mill. / XIX International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics» // A collective monograph edited by Marcin Knapinski. Czestochowa, Poland, EU. 2018. Series: Monografie № 78, pp.168–173. (in English).

## References

1. Mukhin Yu.A., Solovyov V.N., Bobkov E.B. Effect of a deformation and speed schedule of hot rolling in roughing stands of hot strip mills on a structure of steel grade St3. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2018, no. 11 (1043), pp. 12–15. (In Russ.)
2. Dozhnikov V.I., Ganul A.O., Mordovkin D.S. Optimizing an operation of power and process facilities for heating steel before rolling. *Stal* [Steel], 2018, no. 2, pp. 69–71. (In Russ.)
3. Mukhin Yu.A., Belskiy S.M., Chuprov V.B., Bakhaev K.V., Stoyakin A.O. Features of a temperature field of steel strips during hot rolling. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Universities' Proceedings. Ferrous Metallurgy], 2015, vol. 58, no. 6, pp. 417–421. (In Russ.)
4. Mazur V.L., Nogovitsyn A.V. *Teoriya i tekhnologiya tonkolistovoy prokatki (chislennyi analiz i tekhnicheskie predlozheniya)* [Theory and technology of thin sheet rolling (a numerical analysis and technical proposals)]. Dnepropetrovsk: RVA Dnipro-VAL, 2010, 493 p. (In Russ.)
5. Solovyov V.N., Bobkov E.B. A temperature schedule increasing performance of a hot strip mill, when producing low-carbon steels. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2020, no. 8, pp. 15–19. (In Russ.)
6. Levandovskiy S.A., Kinzin D.I., Sarancha S.Yu. On the issue of simulating metal forming processes: methods for optimizing software. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 75-oy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current problems of modern science, equipment and education: proceedings of the 75<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference]. Volume 1. Magnitogorsk: NMSTU, 2017, pp. 76–79. (In Russ.)
7. Kalchenko A.A., Pashchenko K.G. *Modelirovanie protsessov OMD s ispolzovaniem sovremennykh programmnykh produktov: uchebnoe posobie* [Simulating metal forming processes using modern software: a tutorial]. Magnitogorsk, 2017. (In Russ.)
8. Bolobanova N.L., Garber E.A. Numerical modeling of a slab deformation process at various reduction values in vertical rolls of roughing stands on rolling mill 2000. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2021, no. 77(6), pp. 675–681. (In Russ.)
9. Polyakov A.V., Shatshu Netshutzim R., Mazur I.P. Effect of process parameters of rolling in universal stands on shifting steel from edges to a longitudinal axis of workpieces. Report 1. Process parameters. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2020, no. 8, pp. 20–24. (In Russ.)
10. Polyakov A.V., Shatshu Netshutzim R., Mazur I.P. Effect of process parameters of rolling in universal stands on shifting steel from edges to a longitudinal axis of workpieces. Report 2. Critical point. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2020, no. 9, pp. 45–48. (In Russ.)

11. Klimes L., Stetina J., Parilak L., Bucek P. Study of thermal behavior of continuously cast billets. *Engineering Mechanics*, vol. 20, 2013, no. 3/4, pp. 237–246.
12. Markowski J., Knapinski M., Koczurkiewicz B., Fraczek T. The physical modelling of the process of normalizing rolling of S355J2G3 steel plates. *The Metallurgist*, 74 (6), 2007, pp. 296–300.
13. Kononov Yu.V. *Spravochnik prokatchika. V dvukh knigakh. Kniga 1. Proizvodstvo goryachekatanykh listov i polos* [Reference book for rolling mill operators. In two books. Book 1. Hot rolled sheets and strips.]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 640 p. (In Russ.)
14. Levykina A.G., Chabonenko A.A., Shkatov V.V., Mazur I.P. The study of the thermal state of the metal in the production of the hot rolled strips in Deform 3D. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, no. 1134 (1), pp. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012034
15. Mazur I., Levykina A., Laber K. The mathematical model of the thermal state of the metal in the hot rolling mill. The 19<sup>th</sup> International Scientific Conference “New Technologies and Achievements in Metallurgy, Material Engineering, Production Engineering and Physics”. A collective monograph edited by Marcin Knapinski. Czestochowa, Poland, EU. 2018. Series: Monografie, no. 78, pp. 168–173.

Поступила 06.08.2021; принята к публикации 27.08.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 06/08/2021; revised 27/08/2021; published 27/09/2021

**Левыкина Анна Геннадьевна** – аспирант,  
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.  
Email: levykina\_ag@stu.lipetsk.ru. ORCID 0000-0003-4143-1475

**Горбунов Кирилл Сергеевич** – аспирант,  
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.  
Email: beluivolk96@mail.ru. ORCID 0000-0002-5965-766X

**Позднякова Анна Ивановна** – аспирант,  
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.  
Email: mashina\_ann@mail.ru. ORCID 0000-0001-7186-0241

**Соловьев Владимир Николаевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.  
Email: solovyovvn@mail.ru. ORCID 0000-0003-1453-2422

**Anna G. Levykina** – Postgraduate Student,  
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.  
Email: levykina\_ag@stu.lipetsk.ru. ORCID 0000-0003-4143-1475

**Kirill S. Gorbunov** – Postgraduate Student,  
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.  
Email: beluivolk96@mail.ru. ORCID 0000-0002-5965-766X

**Anna I. Pozdnyakova** – Postgraduate Student,  
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.  
Email: mashina\_ann@mail.ru. ORCID 0000-0001-7186-0241

**Vladimir N. Solovyov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.  
Email: solovyovvn@mail.ru. ORCID 0000-0003-1453-2422



## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.77.04  
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-109-114



### АНАЛИЗ АКТУАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Полецков П.П., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Кухта Ю.Б.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Материалы, применяемые в экстремальных условиях Крайнего Севера и Арктики, должны обладать комбинацией трудно сочетаемых характеристик: высокой прочностью, пластичностью, вязкостью при низких температурах и свариваемостью, а также характеризоваться низкой чувствительностью к концентраторам напряжений и отсутствием склонности к хрупкому разрушению. Однако традиционные подходы к достижению комплекса свойств материалов, отвечающего условиям эксплуатации, обеспечивают повышение значений одного из свойств с одновременной потерей уровня остальных или некоторых из них. Проблема усугубляется тем, что понижение температуры эксплуатации сопровождается ухудшением пластичности и ударной вязкости материала. Поэтому представленная на мировом рынке продукция удовлетворяет повышенным требованиям только по одному из ключевых параметров, определяющих узконаправленность их применения (либо износостойкость, либо хладостойкость, либо высокая прочность и т. д.). Это ограничивает возможность ее применения в условиях одновременного воздействия низких температур, агрессивных сред, статических, динамических, импульсных или циклических нагрузок, а также интенсивного износа. В статье показана необходимость производства новых многофункциональных импортозамещающих материалов, обладающих уникальной комбинацией вышеперечисленных свойств и хладостойкости при температуре до минус 70 °С. Освоение инновационной технологии производства указанных материалов планируется в промышленных условиях ПАО «ММК» совместно с учеными ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при поддержке Минобрнауки России. Комбинация основных характеристик разрабатываемых материалов превосходит существующие на мировом рынке материалы аналогичного назначения. Это определяет возможность его одновременного многоцелевого применения в объектах и конструкциях ответственного назначения.

**Ключевые слова:** импортозамещение, многофункциональные материалы, инновационная технология, прочность, износостойкость, хладостойкость, Крайний Север, Арктика.

*Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием высшего учебного заведения (Соглашение № 075-11-2021-063 от 25.06.2021 г.).*

© Полецков П.П., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Кухта Ю.Б., 2021

#### Для цитирования

Анализ актуальных направлений исследований в области производства многофункциональных материалов для экстремальных условий эксплуатации / Полецков П.П., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Кухта Ю.Б. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 109–114. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-109-114>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# ANALYSIS OF CURRENT AREAS OF RESEARCH IN PRODUCTION OF MULTIFUNCTIONAL MATERIALS FOR EXTREME OPERATING CONDITIONS

Poletskov P.P., Gulin A.E., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Kukhta Yu.B.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The materials used in the extreme conditions of the Far North and the Arctic should have a set of characteristics that are hard to combine: high strength, ductility, toughness at low temperatures and weldability, as well as low sensitivity to stress concentrators and no tendency to brittle fracture. However, conventional approaches to achieving a complex of materials properties that meet the operating conditions provide an increase in the values of one of the properties with a simultaneous loss of the level of the rest or some of them. The problem is aggravated by the fact that a decrease in the operating temperature is accompanied by lower ductility and impact toughness of the material. Therefore, the products presented on the world market satisfy increased requirements only for one of the key parameters that determine a narrow focus of their application (either wear resistance, or cold resistance, or high strength, etc.). This limits the possibility of their application under the simultaneous influence of low temperatures, corrosive environments, static, dynamic, cyclic or pulse loads and intensive wear. The paper demonstrates a need for producing new multifunctional import-substituting materials with a unique combination of the above mentioned properties and cold resistance at down to minus 70 °C. The innovative technology for these products is planned to be developed on the industrial site of PJSC MMK with scientists from Nosov Magnitogorsk State Technical University and supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia. The combination of the basic characteristics of materials under development is superior to the materials of a similar application existing on the world market. This determines an opportunity of their simultaneous multipurpose use in critical facilities and structures.

**Keywords:** import substitution, multifunctional materials, innovative technology, strength, wear resistance, cold resistance, the Far North, the Arctic.

*The research was funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of an integrated project aimed at developing high-technology production and carried out with the participation of a higher education institution (Agreement No. 075-11-2021-063 dated June 25, 2021).*

## For Citation

Poletskov P.P., Gulin A.E., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Kukhta Yu.B. Analysis of Current Areas of Research in Production of Multifunctional Materials for Extreme Operating Conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 109–114. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-109-114>

## Введение

В последние годы одной из приоритетных задач мирового значения является обеспечение условий для освоения и устойчивого развития Северных территорий и Арктической зоны – объекта территориальных, ресурсных и стратегических интересов ряда государств, влияющего на развитие экономики и энергетики ближайших десятилетий. В условиях борьбы с последствиями экономического кризиса и санкций, а также проведения политики импортозамещения вопрос объединения усилий науки, государства и бизнеса для решения комплекса проблем по освоению Арктики становится крайне актуальным. Это подтверждается ключевыми положениями «Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» (Указ Президента РФ от 5.03.2020 г. № 164).

При этом материалы, применяемые в экстремальных условиях Крайнего Севера и Арктики, должны обладать комбинацией трудносочетаемых характеристик: высокой прочностью, пластичностью, вязкостью при низких температурах и свариваемостью, а также характеризоваться низкой чувствительностью к концентраторам напряжений и отсутствием склонности к хрупкому разрушению. Проблема усугубляется тем, что понижение температуры эксплуатации сопровождается ухудшением пластичности и ударной вязкости материала.

## Основная часть

Следует отметить, что создание материалов для применения в экстремальных условиях эксплуатации, в том числе в условиях Арктики и Крайнего Севера, сопряжено с решением ряда

проблем, связанных с воздействием сверхнизких критических температур, статических, циклических и динамических нагрузок, интенсивного износа и т.д. Однако большинство существующих разработок обеспечивают производство материалов узкоспециализированного назначения.

К числу мировых производителей – лидеров в рассматриваемом направлении относят:

1. Японская сталелитейная компания Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation Group ([www.nipponsteel.com](http://www.nipponsteel.com)). Компания производит хладостойкие стали различного назначения, в том числе низкотемпературная износостойкая листовая сталь ABREX 400LT, 450LT, 500LT [1]. Широко используется при изготовлении оборудования, работающего в металлургическом производстве и горнодобывающей промышленности, где требуется высокая стойкость к интенсивному износу в течение длительного ударного и абразивного воздействия.

2. Компания JFE Steel Corporation (Япония, [www.jfe-steel.co.jp](http://www.jfe-steel.co.jp)). Компания производит высокопрочную хладостойкую сталь (JFE-HITEN590U2L, JFE-HITEN590L, JFE-HITEN610U2L, JFE-HITEN610L, JFE-HITEN690L, JFE-HITEN710L, JFE-HITEN780L, JFE-HITEN780FL, JFE-HITEN780ML) для изготовления механизмов, машин и конструкций, работающих при низких температурах (до -60°C) [2].

3. Компания DILLINGER (Германия, [www.dillinger.de](http://www.dillinger.de)). Компания производит конструкционные стали, в том числе ультравысокопрочные стали DILLIMAX Grade E (DILLIMAX 690 E - 965 E, DILLIMAX 1100) с повышенной хладостойкостью до -60°C [3].

4. Компания SSAB (Швеция, [www.ssab.com](http://www.ssab.com)). Компания производит высокопрочные стали, в том числе низкотемпературные, которые отвечают требованиям большинства международных стандартов, в том числе высокопрочная конструкционная сталь Strenx для мостостроения, производства подъемных механизмов и средств транспортировки грузов [4].

5. Компания NLMK Clabecq (Бельгия, [nlmk.com](http://nlmk.com)). Компания производит конструкционные стали. Сталь марки QUARD – легированная листовая сталь, которая относится к классу мартенситных сталей средней твердости. Выпускается листовая сталь QUARD в нескольких модификациях, которые различают по степени твердости [5].

Примером материалов, используемых в рассматриваемых условиях, может служить прокат из высокопрочных хладостойких сталей. Высокопрочные конструкционные стали Dillimax 965 Extratough производства компании Dillinger и Strenx 960 производства компании SSAB обладают высоким уровнем прочностных свойств (вре-

менное сопротивление разрыву 980-1150 МПа, предел текучести более 960 МПа), однако имеют ограничения по температурным условиям эксплуатации (Dillimax 965 Extratough: работа удара KV= 27-30 Дж при минус 60 °C; Strenx 960: работа удара KV более 40 Дж при минус 40°C).

Износостойкая сталь DILLIDUR 400 (производство компании Dillinger) разработана для применения в условиях интенсивного износа и имеет высокие показатели твердости HBW = 370–430, но при этом более низкие прочностные характеристики (временное сопротивление разрыву 1200 МПа, условный предел текучести 800 МПа). Износостойкие стали ABREX 400 LT [6] (производство компании Nippon Steel) и Hardox®400 (производство компании SSAB) имеют аналогичный уровень свойств.

В то же время сталь Dillimax 690 Extra tough (производство компании Dillinger) и Strenx 700 E/F (производство компании SSAB) имеют диапазон работы удара KV= 27–70 Дж при критических температурах до минус 60°C, что делает возможным их применение в условиях Крайнего Севера, однако при этом данные материалы отличаются относительно невысокими показателями механических свойств (временное сопротивление разрыву 780–930 МПа, условный предел текучести 700 МПа). Аналогичные закономерности наблюдаются при анализе комплекса свойств сталей ABREX 450LT, Hardox®450, DILLIDUR 450, ABREX 500 LT, Hardox®500, Hardox®500 Tuf, DILLIDUR 500 и др.

В результате аналитического обзора хладостойкие стали зарубежных производителей в зависимости от достигаемого уровня свойств были сгруппированы по четырем направлениям (видам) (табл. 1).

Таким образом, на основе сравнительного анализа установлено, что высокопрочные хладостойкие марки стали удовлетворяют повышенным требованиям только по одному из ключевых параметров (либо износостойкость, либо хладостойкость, либо высокая прочность и т.д.), определяющих узконаправленность их применения. Это ограничивает возможность их применения в условиях одновременного воздействия низких температур, агрессивных сред, статических, динамических, импульсных или циклических нагрузок, а также интенсивного износа.

В связи с этим на базе проведенного анализа были разработаны уникальные комбинации требований для производства новых сталей, характеризующихся обеспечением одновременно и высокой прочности, и пластичности, а также износо-, атмосферо- и хладостойкости при температуре до минус 70°C.

Таблица 1. Основные характеристики сталей импортного производства  
Table 1. Main characteristics of imported steels

Марка стали	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\Delta_5$ , %	Работа удара при температуре испытания	
				KV, Дж	$t$ , °C
Вид 1					
Dillimax 690 Extra tough, (Dillinger)	770-930	$\geq 690$	$\geq 14$	$\geq 30$	-60
Strenx 700 E/F (SSAB)	780-930	$\geq 700$	$\geq 14$	$\geq 27$	-60
JFE-LT415TM (JFE Steel Corporation)	550-690	$\geq 415$	$\geq 20$	$\geq 41$	-60
Quend 700 (NLMK Clabecq)	780–930	700	$\geq 14$	27	-40
Вид 2					
Dillimax 965 Extra tough (Dillinger)	980-1150	$\geq 960$	$\geq 12$	$\geq 30$	-60
Strenx 960 (SSAB)	980-1150	$\geq 960$	$\geq 12$	$\geq 40$	-40
Quend 940-960 (NLMK Clabecq)	780-1150	940-960	$\geq 12$	27	-40
JFE-HITEN 780ML (JFE Steel Corp.)	760-930	450-685	$\geq 24$	$\geq 34$	-60
Вид 3					
Dillimax 1100 Extra tough (Dillinger)	1200-1500	$\geq 1100$	$\geq 10$	$\geq 30$	-40
Strenx 1100 (SSAB)	1250-1550	$\geq 1100$	$\geq 10$	$\geq 27$	-60
Quard 400 (NLMK Clabecq)	1300	1160	$\geq 10$	$\geq 40$	-40
EVERHARD-C400LE (JFE Steel Corp.)	1096	971	21	$\geq 27$	-40
Вид 4					
ABREX 500 LT (Nippon Steel)	1700	1200	-	$\geq 21$	-40
DILLIDUR 500 V (Dillinger)	1650	1300	-	25	-20
EVERHARD-C500LE (JFE Steel Corp.)	1680	1200	$\geq 17$	$\geq 21$	-40
ABREX 400 LT -450 LT (Nippon Steel)	1200-1470	1090-1160	-	$\geq 27$	-40

Вместе с тем процесс изготовления таких материалов, как правило, строго регламентирован и очень «чувствителен» к изменениям технологических режимов [7–9]. Это может приводить к существенным изменениям свойств в сплавах с близким химическим составом. С другой стороны, это обуславливает возможность управления свойствами таких материалов в широком диапазоне [10], что в совокупности с применением современных методов термомеханической обработки позволяет обеспечить уникальный комплекс свойств конечной продукции.

#### Характеристика объекта разработки

Учеными ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» совместно с ПАО «ММК» при поддержке Минобрнауки России начата реализация комплексного проекта по разработке и освоению инновационной технологии производства 4-х видов металлопроката из многофункциональных импортозамещающих материалов, обладающих уникальной комбинацией высокой прочности, пластичности, а также износо- и хладостойкости при температуре до минус 70°C. Данный проект реализуется в рамках постановления Правительства № 218 и соответствует приоритетному направлению, установленному Стратегией научно-технологического развития РФ: «переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки боль-

ших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

Каждая из комбинаций основных характеристик разрабатываемых материалов представляет собой уникальное сочетание высокой прочности, пластичности, а также износо- и хладостойкости (табл. 2).

Таблица 2. Основные характеристики разрабатываемых видов продукции  
Table 2. Main characteristics of the types of products under development

Основные характеристики	Создаваемая продукция			
	Вид 1	Вид 2	Вид 3	Вид 4
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	580-950	950-1200	1200-1500	$\geq 1500$
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	$\geq 500$	$\geq 800$	$\geq 950$	$\geq 1100$
Относительное удлинение $\Delta_5$ , %	$\geq 20$	$\geq 14$	$\geq 13$	$\geq 10$
Относительное удлинение $\Delta_{50}$ , %	$\geq 22$	$\geq 15$	$\geq 14$	$\geq 12$
Твёрдость, HBW	160-280	280-350	350-450	450-570
Работа удара KV, Дж	$\geq 80$	$\geq 40$	$\geq 30$	$\geq 20$
Температура t, °C	-70	-70	-70	-70

Это определяет возможность их одновременного многоцелевого применения в конструкциях и объектах нефтегазового комплекса России, а также мостостроения, строительства, транспортного и тяжелого машиностроения и других отраслей промышленности. Примером могут служить следующие изделия ответственного назна-



чения, в том числе эксплуатируемые в условиях Крайнего Севера и Арктики:

- объекты инфраструктуры (эстакады, мачты, резервуары, переходные мостики, площадки обслуживания) и трубы для перспективных проектов добычи и транспортировки ПАО «Газпром» и других предприятий нефтегазового комплекса;

- конструкции транспортного машиностроения, в том числе вагоностроения;

- элементы подъемно-транспортного оборудования и средств транспортировки грузов;

- детали узлов и элементы горнодобывающей, карьерной, сельскохозяйственной, а также лесозаготовительной и деревообрабатывающей техники;

- конструкции мостов;

- элементы палуб и платформ судов;

- несущие сварные каркасные конструкции;

- детали узлов, рамных и корпусных элементов техники широкого применения и т.д.

Технико-экономическая эффективность применения разрабатываемых материалов в экстремальных условиях обусловлена возможностью эксплуатации конструкций в условиях сверхнизких критических температур (до минус 70°C), а также существенным снижением массы и повышением несущей способности и долговечности создаваемых объектов за счет высокого уровня прочностных свойств.

### Заключение

Проведенный анализ позволил определить основные позиции аналогов импортных материалов для экстремальных условий эксплуатации и основные требования к механическим характеристикам разрабатываемых материалов, что позволило установить:

1. Представленная на мировом рынке продукция удовлетворяет повышенным требованиям только по одному из ключевых параметров, определяющих узконаправленность их применения (либо износостойкость, либо хладостойкость, либо высокая прочность и т.д.). Это ограничивает возможность ее применения в условиях одновременного воздействия низких температур, агрессивных сред, статических, динамических, импульсных или циклических нагрузок, а также интенсивного износа.

2. Комбинация основных характеристик разрабатываемого материала превосходит существующие на мировом рынке материалы аналогичного назначения и представляет собой уникальное сочетание высокой прочности, пластичности, а также износо- и хладостойкости. Это определяет возможность его одновременного многоцелевого применения в объектах и конструкциях ответственного назначения.

3. Разрабатываемый материал – принципиально новый результат, не представленный ранее на мировом рынке.

### Список литературы

1. ABREX. Abrasion resistant steel plate. URL: [https://www.nipponsteel.com/product/catalog\\_download/pdf/A010e\\_s.pdf](https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/A010e_s.pdf) (дата обращения: 18.08.2021)
2. JFE Steel Corporation catalog. URL: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/catalog/c1e-001.pdf> (дата обращения: 18.08.2021)
3. Dillinger proprietary steels. URL: <https://www.dillinger.de/d/en/products/proprietary-steels/index.shtml> (дата обращения: 18.08.2021)
4. Strenx. Performance Steel. URL: <https://www.ssab.com/products/brands/strenx> (дата обращения: 18.08.2021)
5. NLMK Clabecq page. <https://eu.nlmk.com/en/plate/clabecq/> (дата обращения: 18.08.2021)
6. ABREX 400LT: Alloy Digest (2016) 65 (5): SA-752. 2016. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.ad.sa0752>
7. Chernyshov E., Baev I., Romanov A., Romanova E. Cold resistance and mechanical properties of high-strength medium alloy steel depending on the technology of cast billets production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 62. 2019. 79-84. DOI:10.17073/0368-0797-2019-1-79-85.
8. Khlusova E.I., Sych O.V., Orlov V.V. Cold-Resistant Steels: Structure, Properties, and Technologies. *Physics of Metals and Metallography*, June 2021, Volume 122, Issue 6, pp. 579-613.
9. Poleckov Pavel P. et al. Effects of Heat Treatment on Microstructure Parameters, Mechanical Properties and Cold Resistance of Sparingly Alloyed High-Strength Steel. *Defect and Diffusion Forum*, vol. 410, Trans Tech Publications, Ltd., Aug. 2021, pp. 197–202. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/ddf.410.197.
10. Borisova L.G. and Gorshkova T.P. Studying Resistance to Cold in Low-Alloy Steels. *Key Engineering Materials*, vol. 836, Trans Tech Publications, Ltd., Mar. 2020, pp. 46–51. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/kem.836.46.
11. Назначение и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков, К. Хакимуллин, Д.Г. Набатчиков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 85–88. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-88.

### References

1. ABREX. Abrasion resistant steel plate. Available at: [https://www.nipponsteel.com/product/catalog\\_download/pdf/A010e\\_s.pdf](https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/A010e_s.pdf) (Accessed on August 18, 2021)
2. JFE Steel Corporation catalog. Available at: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/catalog/c1e-001.pdf> (Accessed on August 18, 2021)

3. Dillinger proprietary steels. Available at: <https://www.dillinger.de/d/en/products/proprietary-steels/index.shtml> (Accessed on August 18, 2021)
4. Strenx. Performance Steel. Available at: <https://www.ssab.com/products/brands/strenx> (Accessed on August 18, 2021)
5. NLMK Clabecq page. Available at: <https://eu.nlmk.com/en/plate/clabecq/> (Accessed on August 18, 2021)
6. ABREX 400LT: Alloy Digest (2016) 65 (5): SA-752. 2016. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.ad.sa0752>
7. Chernyshov E., Baev I., Romanov A., Romanova E. Cold resistance and mechanical properties of high-strength medium alloy steel depending on the technology of cast billets production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, 62, pp. 79-84. DOI:10.17073/0368-0797-2019-1-79-85
8. Khlusova E.I., Sych O.V., Orlov V.V. Cold-resistant steels: structure, properties, and technologies. *Physics of Metals and Metallography*, June 2021, volume 122, issue 6, pp. 579-613.
9. Poleckov P.P. et al. Effects of heat treatment on microstructure parameters, mechanical properties and cold resistance of sparingly alloyed high-strength steel. *Defect and Diffusion Forum*, vol. 410, Trans Tech Publications Ltd., Aug. 2021, pp. 197–202. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/ddf.410.197
10. Borisova L.G., Gorshkova T.P. Studying resistance to cold in low-alloy steels. *Key Engineering Materials*, vol. 836, Trans Tech Publications Ltd., Mar. 2020, pp. 46–51. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/kem.836.46
11. Poletskov P.P., Khakimullin K., Nabatchikov D.G. et al. The purpose and the application of ultra-low temperature resistant nanostructured rolled steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 85-88. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-8

Поступила 19.08.2021; принята к публикации 25.08.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 19/08/2021; revised 25/08/2021; published 27/09/2021

**Полецков Павел Петрович** – доктор технических наук, директор инжинирингового центра, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru). ORCID 0000-0001-9209-7759

**Гулин Александр Евгеньевич** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [a.gulin@magtu.ru](mailto:a.gulin@magtu.ru). ORCID 0000-0002-7722-4112

**Емалеева Динара Гумаровна** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [emaleevadg@mail.ru](mailto:emaleevadg@mail.ru)

**Кузнецова Алла Сергеевна** – младший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [allakuznetsova.mgtu@mail.ru](mailto:allakuznetsova.mgtu@mail.ru)

**Алексеев Даниил Юрьевич** – инженер-исследователь, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [d.u.alekseev@mail.ru](mailto:d.u.alekseev@mail.ru)

**Кухта Юлия Борисовна** – доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [perfectumyuka@mail.ru](mailto:perfectumyuka@mail.ru)

**Pavel P. Poletskov** – DrSc (Eng.), Director of the Engineering Center, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru). ORCID 0000-0001-9209-7759

**Aleksandr E. Gulin** – PhD (Eng.), Junior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [a.gulin@magtu.ru](mailto:a.gulin@magtu.ru). ORCID 0000-0002-7722-4112

**Dinara G. Emaleeva** – PhD (Eng.), Junior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [emaleevadg@mail.ru](mailto:emaleevadg@mail.ru)

**Alla S. Kuznetsova** – Junior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [allakuznetsova.mgtu@mail.ru](mailto:allakuznetsova.mgtu@mail.ru)

**Daniil Yu. Alekseev** – Research Engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [d.u.alekseev@mail.ru](mailto:d.u.alekseev@mail.ru)

**Yuliya B. Kukhta** – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Computer Science and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [perfectumyuka@mail.ru](mailto:perfectumyuka@mail.ru)